



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudio experimental de los paneles de Odgaard para trabajar en contra del efecto Bulle.

Trabajo realizado por:

Pablo Díaz Camblor

Dirigido por:

Allen Bateman Pinzón

Grado en:

Ingeniería de Obras Públicas

Barcelona, 19 de Junio de 2015

Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental

TRABAJO FINAL DE GRADO

Resumen

Las derivaciones son tramos fluviales, naturales o artificiales, en los cuales una de las ramas sigue su curso, mientras que la otra sale lateralmente con un cierto ángulo de desvío. El estudio de estos sistemas es de vital importancia, ya que el desconocimiento de sus características puede provocar consecuencias catastróficas desde el punto de vista humano, económico y medioambiental, debido al peculiar comportamiento que tiene el flujo y el transporte de sedimento, destacando principalmente la aparición de flujos secundarios en forma de vórtices y la presencia de zonas de erosión y sedimentación cerca de la entrada al desvío.

En el actual documento se detallará el procedimiento constructivo y las actividades de calibración que se ha llevado a cabo para la correcta realización de un canal en modelo reducido, donde se llevarán a cabo unos ensayos, los resultados de los cuales muestran la evolución de caudales líquidos, caudales sólidos y de la morfología del lecho.

Además, con el objetivo de poder corregir los posibles efectos perjudiciales provocados por la derivación, se han realizado diferentes pruebas con la implantación de paneles sumergidos (también conocidos como paneles de Odgaard) en distintos tramos del canal, con el fin de contrarrestar los flujos secundarios debidos a la derivación y obtener así un sistema global mucho más equilibrado en cuanto al reparto sólido y líquido por los dos ramales.

Abstract

The diversions are river stretches, natural or artificial, in which one of the branches follows its flow, while the other one diverts laterally with a certain angle of diversion. The study of these systems is vital, considering that the lack of awareness of its characteristics can cause catastrophic consequences from the human, economical and environmental perspectives due to the peculiar behavior of the flow and the transport of sediments, specially highlighting the appearance of secondary flows in vortex shape and the presence of erosion and sedimentation zones close to the diversion's entrance. In this document, there will be detailed the structural procedure and the calibration activities that have been carried out for the correct realization of a channel in a reduced model, where some tests will be carried out and which results will show the evolution of the liquid volume, solid volumen and the riverbed's morphology.

Also, with the objective of being able to correct the possible detrimental effects caused by the derivation, different tests with the implementation of submerged panels (also known as Odgaard's panels) have been carried out in order to resist the secondary flows, due to the derivation, and thus obtaining a much more balanced global system regarding the solid and liquid distribution through both branches.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer la dedicación y el esfuerzo realizado al Grupo de Investigación de Transporte de Sedimentos (GITS), en especial al tutor Allen Bateman Pinzón, que ha seguido el desarrollo de la investigación desde su inicio y ha proporcionado los conocimientos necesarios para que el trabajo llegara a buen puerto. También destacar el apoyo, tanto en la fase de construcción como en el aporte de información relativa a la colocación de paneles, de Khaled Hamat, cuyos conocimientos han sido vitales para solventar muchos de los problemas que se han ido sucediendo.

Doy las gracias también la colaboración de algunos compañeros de universidad que han apoyado la investigación, en especial la ayuda proporcionada por David Brun en los momentos más decisivos al final de la investigación, aportando soluciones eficaces ayudando a procesar parte de la información obtenida en el laboratorio.

Finalmente, agradecer también el trabajo realizado por mi compañero de investigación Robert Blanco Casas, con el cual se ha compaginado de forma correcta tanto las actividades experimentales realizadas en el laboratorio como el procesamiento y análisis de los datos obtenidos. Sin su ayuda el resultado final de la investigación no hubiera sido el mismo.

Contenido

1.	Memoria.....	14
1.1.	Introducción	14
1.1.	Motivación	16
1.1.1.	Introducción y contexto	16
1.1.2.	La problemática del canal Naranjo.....	20
1.1.3.	Impactos generados por el canal Naranjo	22
1.2.	Introducción general al modelo y objetivos de la investigación.....	25
1.3.	Estructura del documento.....	27
2.	Marco teórico (Estudios previos)	29
2.1.	Comportamiento de flujo y sedimento en derivaciones.....	29
2.1.1.	Consideraciones previas.....	29
2.1.2.	Fundamentación teórica	30
2.1.3.	Estudios previos	34
2.2.	Gestión del sedimento a la entrada de una derivación: Paneles sumergidos	43
2.2.1.	Introducción	43
2.2.2.	Fundamentación teórica	44
2.2.3.	Estudios previos	46
3.	Preparación a los ensayos y metodología de trabajo	52
3.1.	Introducción y descripción del lugar de trabajo	52
3.2.	Procedimiento constructivo	56
3.3.	Calibración de caudales.....	64
3.3.1.	Calibración de caudal líquido	64
3.3.2.	Calibración de caudales sólidos.....	74
3.4.	Procedimiento de los ensayos.....	77
3.4.1.	Ensayos 1 y 2: Comportamiento del flujo y el sedimento sin la presencia de paneles sumergidos.....	79

3.4.2.	Ensayos 3 y 4: Comportamiento del flujo y el sedimento con la colocación de paneles sumergidos.....	83
4.	Resultados y conclusiones.....	87
4.1.	Resultados	87
4.1.1.	Comportamiento del sistema sin la colocación de paneles sumergidos	87
4.2.1.	Comportamiento del sistema con la colocación de paneles sumergidos	103
4.2.	Discusión de los resultados	108
4.3.	Conclusiones y experiencias.....	112
4.4.	Futuras líneas de investigación	114
	Bibliografía	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de la zona de aguas bajas del río Rin, con diferentes derivaciones.	14
Figura 2: Mapa del delta del Orinoco. Se observa el entramado de cauces con las respectivas bifurcaciones y confluencias.	15
Figura 3: Ecosistema de la isla de Gorgona. Su biodiversidad está en peligro debido al exceso de sedimento que llega a la zona proveniente del río Magdalena.	16
Figura 4: Mapa político de las provincias de la costa Pacífico de Colombia.	17
Figura 5: Definición de la zona de estudio. Se observa la unión del Sanquianga y el Patía Viejo mediante el canal Naranjo.	18
Figura 6: Principales vías de comunicación terrestres de la parte sur de la provincia de Nariño.	19
Figura 7: Evolución del río Patía en el tramo de la bifurcación. Vista aérea del tramo antes de la formación de la bifurcación en 1962 (a) y después de su formación en 1986 (b), 2001 (c) y 2008 (d).	21
Figura 8: Situación actual de la bifurcación del río Patía. Se observa como el nuevo ramal tiene unas dimensiones muy superiores a las del antiguo. También se observa el área de sedimentación entre los dos ramales.	22
Figura 9: Catástrofe producida por la crecida del canal Naranjo en la localidad de Bocas de Satinga.	22
Figura 10: Cambios del cauce del río Sanquianga en las últimas décadas alrededor del municipio de Bocas de Satinga . Azul (1990), amarillo (2001) y rojo (2007).	23
Figura 11: La disminución de caudal en el cauce del Patía Viejo ha causado problemas en la navegabilidad de los ríos, como por ejemplo alrededor de Tumaco, Colombia.	24
Figura 12: Esquema general de una toma lateral, en este caso con un ángulo de desvío de 90°.	25
Figura 13: Esquema de la derivación con las líneas de separación de flujo a distintos niveles. Se observa como la línea correspondiente a la zona más cercana al fondo se extiende más en el canal principal que las correspondientes a capas más superiores.	32
Figura 14: Resultados medidos por Shettar y Murthy (1996) y simulados por Khan (2000) relativos a la distribución de velocidades en tres secciones del canal lateral cercanas a la zona de desvío.	33

Figura 15: Posición de las zonas de recirculación en derivaciones. Se observa la aparición de éstas en la pared adyacente a la esquina de aguas arriba del desvío (ramal lateral) y en la pared opuesta a la derivación, aguas debajo de ésta (ramal principal).....	34
Figura 16: Esquema de los patrones relativos al flujo en derivaciones (superficie divisoria del flujo, zonas de recirculación y vórtices).	34
Figura 17: Primeras pruebas realizadas por H. Toma, con un ángulo de derivación de 30º y borde interior redondeado.	36
Figura 18: Segunda tanda de experimentos de H. Toma, esta vez con un ángulo de desvío de 90º y borde interior sin redondear.	36
Figura 19: Esquema de la zona de la derivación en los experimentos de H. Bulle, con las áreas de recirculación de flujo y los vórtices generados.	37
Figura 20: Diagrama realizado por H. Bulle después de realizar los experimentos en los cuales hizo modificaciones en la relación de toma. Se observa la aportación perteneciente a cada rama del modelo en función del caudal circulante por cada rama.	38
Figura 21: Gráfica de los resultados obtenidos por Dancy, donde se muestra la relación entre la relación de toma (Q_1/Q) y el coeficiente de captación sólida (T_1/T), para diferentes valores del parámetro adimensional α	40
Figura 22: Porcentaje de sedimento desviado hacia el ramal lateral en función de la posición y orientación de éste en relación al curso principal.	43
Figura 23: Comportamiento del flujo inducido por los paneles sumergidos. Se observa el vórtice generado debido a la diferencia de presiones entre las caras del panel.....	44
Figura 24: Efectos producidos por los paneles sumergidos en el lecho del río. El vórtice generado coloca el sedimento a un lado de la sección, produciendo una depresión al otro lado.	45
Figura 25: Esquema del flujo helicoidal producido por los paneles y el consecuente formación de la pendiente transversal (línea punteada) en la zona cercana a la derivación.....	46
Figura 26: Vistas en alzado y planta de la disposición de paneles en grupos de tres, destacando los principales parámetros de diseño.	46
Figura 27: Vista en planta del canal (acotado).....	53
Figura 28: Depósito de entrada al canal.....	53
Figura 29: Bomba utilizada, situada al principio del canal.....	54
Figura 30: Tolva que suministra la arena al canal.	54
Figura 31: Depósitos de salida con el nivel de agua ajustado para iniciar los ensayos.	55
Figura 32: Bases del canal antes de iniciar el trabajo. Se observa el avanzado estado de oxidación de la pieza.	57

Figura 33: Barras con gomaespuma sobre las que se apoya el canal principal.	57
Figura 34: Apoyos del ramal lateral.	58
Figura 35: Piezas superiores de metacrilato colocadas para resistir los esfuerzos a los que se ven sometidas las piezas laterales.	59
Figura 36: Panel de abejas en funcionamiento.	59
Figura 37: Pieza metacrilato en forma de L.....	60
Figura 38: Sistema de desagüe del canal. Se observa el resultado final de las tuberías de cada rama y el tanque de salida con los vertederos.	61
Figura 39: Piezómetro instalado en el depósito de salida.	62
Figura 40: Pequeña tubería de desagüe, ubicada bajo el filtro de gravas.	63
Figura 41: Filtro de gravas colocado al final del canal principal.....	63
Figura 42: Filtro de gravas colocado entre el depósito de salida y las tuberías de desagüe.	63
Figura 43: Nivel de referencia de los tanques de salida.....	65
Figura 44: Líneas de tendencia obtenidas con los valores de caudales medidos y calculados en el ramal principal.....	71
Figura 45: Líneas de tendencia obtenidas con los valores de caudales medidos y calculados en el ramal lateral.	72
Figura 46: Línea de tendencia obtenida mediante la relación de caudales totales y frecuencias.	74
Figura 47: Línea de tendencia obtenida para diferentes frecuencias de los valores de caudal sólido medidos.	77
Figura 48: Bandeja de arena secándose al sol.	78
Figura 49: Zona de estudio para los ensayos.	79
Figura 50: Recogida de arena mediante el tamiz.....	80
Figura 51: Secado de las muestras de arena en el horno a 105 grados.....	81
Figura 52: Cintas métricas colocadas en las paredes del canal cada 25 cm.	81
Figura 53: Paneles colocados en el tramo recto del canal, aguas arriba de la derivación.....	84
Figura 54: Paneles en funcionamiento. Se observa el vórtice generado.....	85
Figura 55: Pequeña presa de piedras colocada a la salida del canal principal para las pruebas del ensayo 3.	85
Figura 56: Ubicación de los paneles en el cuarto ensayo.	86
Figura 57: Evolución de caudales líquidos de salida por cada ramal para un caudal de entrada de 13,5 L/s.	90
Figura 58: Evolución de la relación de caudales de cada rama para un caudal líquido de entrada de 13,5 L/s.	90

Figura 59: Evolución de caudales sólidos de salida por cada ramal para un caudal de entrada de 13,5 L/s.....	92
Figura 60: Evolución de la relación de caudales sólidos de cada rama para un caudal líquido de entrada de 13,5 L/s.....	92
Figura 61: Perfil inicial de cotas y calados en el tramo situado en el canal principal.	93
Figura 62: Perfil final de cotas y calados en el tramo situado en el canal principal.	93
Figura 63: Perfil inicial de cotas y calados en el tramo situado en el canal lateral.....	94
Figura 64: Perfil final de cotas y calados en el tramo situado en el canal lateral.	94
Figura 65: Perfil inicial de cotas y calados en la zona del foso.....	95
Figura 66: Perfil final de cotas y calados en la zona del foso.....	95
Figura 67: Foto del foso en los primeros instantes del ensayo.....	96
Figura 68: Foto del foso en los instantes finales del ensayo. Se observa como tiende al estado de lecho plano.....	96
Figura 69: Evolución de caudales líquidos de salida por cada ramal para un caudal de entrada de 14,5 L/s.....	98
Figura 70: Evolución de la relación de caudales de cada rama para un caudal líquido de entrada de 14,5 L/s.....	98
Figura 71: Perfil inicial de cotas y calados en el tramo situado en el canal principal.	99
Figura 72: Perfil final de cotas y calados en el tramo situado en el canal principal.	100
Figura 73: Perfil inicial de cotas y calados en el tramo situado en el canal lateral.....	100
Figura 74: Perfil final de cotas y calados en el tramo situado en el canal lateral.	101
Figura 75: Perfil inicial de cotas y calados en el tramo situado en el foso.....	101
Figura 76: Perfil final de cotas y calados en el tramo situado en el foso.....	102
Figura 77: Estado del foso en los instantes iniciales del ensayo.....	102
Figura 78: Estado del foso en los instantes finales. Se observa como éste ha aumentado su profundidad.....	102
Figura 79: Estado final de la derivación después del ensayo. Hace falta destacar la presencia de grandes islas a la entrada de la zona de desvío.	103
Figura 80: Batimetría realizado mediante vista 3D de la zona afectada por los paneles.	104
Figura 81: Foso generado por los paneles. Se observa la erosión en la zona central y la deposición en los laterales.....	104
Figura 82: Vista de la deformación del lecho en la zona afectada por paneles mediante laser.	105
Figura 83: Batimetría realizada mediante vista 3D de la derivación después del ensayo 4.	106

Figura 84: Estado final de la derivación después del ensayo 4. Se observa el foso y la pérdida de pendiente transversal a la entrada del canal lateral.....	107
Figura 85: Estado del foso con la colocación de paneles en la derivación. El punto de mayor profundidad se ha desplazado aguas abajo del canal lateral.	107
Figura 86: Foso producido en el otro vértice de la derivación, debido a la colocación de paneles.	107
Figura 87: Estado final del lecho, en el que se observa la formación de islas y el foso de la entrada al canal lateral.....	109
Figura 88: Vórtice generado en el vértice aguas abajo de la derivación.	110
Figura 89: Detalle de los grupos de paneles. El segundo y tercer grupo han quedado enterrados en el lecho.	111
Figura 90: Foso formado en la parte central del canal, analizado mediante vista laser.....	111
Figura 91: Foso generado en el vértice aguas arriba de la derivación.....	112
Figura 92: Vórtice producido a la salida del canal principal. La salida de sedimento por este lado es casi perfecta.....	113
Figura 93: Parte final del canal lateral. Se observa la importante acumulación de arena a la entrada de la tubería.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla resumen de los resultados obtenidos referentes al coeficiente de captación sólida en función del ángulo de desvío adoptado.	38
Tabla 2: Características de los canales empleados en las investigaciones de Odgaard y Wang (1991).	50
Tabla 3: Características de ambas de las ramas del modelo de canal utilizado por Barkdoll, Ettema y Odgaard.	52
Tabla 4: Mediciones de niveles realizadas en el depósito izquierdo, con sus medias y coeficientes de variación.....	68
Tabla 5: Mediciones de niveles realizadas en el depósito derecho, con sus medias y coeficientes de variación.....	68
Tabla 6: Valores de caudales medidos obtenidos en el ramal principal.....	69
Tabla 7: Valores de caudales medidos obtenidos en el ramal lateral.....	69
Tabla 8: Caudales obtenidos en el ramal principal mediante la fórmula obtenida	70
Tabla 9: Caudales obtenidos en el ramal lateral mediante la fórmula obtenida.....	71
Tabla 10: Caudales totales obtenidos para los diferentes valores de frecuencias.	73
Tabla 11: Datos obtenidos en la calibración de caudal sólido.	75
Tabla 12: Valores de caudal correspondientes a cada frecuencia.	76
Tabla 13: Caudales utilizados para cada ensayo.	78
Tabla 14: Dimensiones calculadas de los paneles sumergidos.	83
Tabla 15: Evolución del caudal líquido en el ramal principal para un caudal de 13,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.....	88
Tabla 16: Evolución del caudal líquido en la rama lateral para un caudal de 13,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.....	89
Tabla 17: Evolución del reparto de caudales líquidos entre las dos ramas, para un caudal de 13,5 L/s. Se muestra el aporte líquido de cada una de ellas, el caudal total de salida, el porcentaje de cada ramal respecto al total y la relación entre los caudales.....	89
Tabla 18: Evolución del caudal sólido en el ramal principal para un caudal de 13,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.....	91
Tabla 19: Evolución del caudal líquido en el ramal principal para un caudal de 13,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.....	91

Tabla 20: Evolución del reparto de caudales sólidos entre las dos ramas, para un caudal de 13,5 L/s. Se muestra el aporte líquido de cada una de ellas, el caudal total de salida, el porcentaje de cada ramal respecto al total y la relación entre los caudales.	91
Tabla 21: Cotas y calados de las diferentes secciones situadas en el canal principal, en las condiciones iniciales y finales del ensayo.	92
Tabla 22: Cotas y calados de las diferentes secciones situadas en el canal lateral, en las condiciones iniciales y finales del ensayo.	94
Tabla 23: Cotas y calados de las diferentes secciones situadas en la zona del foso, en las condiciones iniciales y finales del ensayo.	95
Tabla 24: Evolución del caudal líquido en el ramal principal para un caudal de 14,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.....	97
Tabla 25: Evolución del caudal líquido en el ramal lateral para un caudal de 14,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.....	97
Tabla 26: Evolución del reparto de caudales líquidos entre las dos ramas, para un caudal de 14,5 L/s. Se muestra el aporte líquido de cada una de ellas, el caudal total de salida, porcentajes respecto al total y la relación entre los caudales de cada ramal.	97
Tabla 27: Evolución del caudal sólido en el ramal principal para un caudal de 14,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.....	98
Tabla 28: Evolución del caudal sólido en el ramal lateral para un caudal de 14,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.....	99
Tabla 29: Evolución del reparto de caudales sólidos entre las dos ramas, para un caudal de 14,5 L/s. Se muestra el aporte líquido de cada una de ellas, el caudal total de salida, el porcentaje de cada ramal respecto al total y la relación entre los caudales.	99
Tabla 30: Cotas y calados de las diferentes secciones situadas en el canal principal, en las condiciones iniciales y finales del ensayo.	99
Tabla 31: Cotas y calados de las diferentes secciones situadas en el canal lateral, en las condiciones iniciales y finales del ensayo.	100
Tabla 32: Cotas y calados de las diferentes secciones situadas en el foso, en las condiciones iniciales y finales del ensayo.	101
Tabla 33: Parámetros calculados en la prueba de funcionamiento de los paneles.....	103
Tabla 34: Caudales líquidos medidos con la colocación de paneles.....	105
Tabla 35: Reparto de caudales líquidos con paneles.	105
Tabla 36: Caudales sólidos medidos con la colocación de paneles.	106
Tabla 37: Reparto de caudales sólidos con paneles.....	106

1. Memoria

1.1. Introducción

Las bifurcaciones fluviales han sido tema de estudio desde las primeras etapas de la ingeniería fluvial debido a la influencia que tienen en diferentes aspectos de la sociedad humana, como por ejemplo zonas de cultivo agrícolas o todo tipo de infraestructuras que puedan estar en las cercanías de la zona conflictiva. Dichas bifurcaciones son puntos donde un río se divide en dos, dividiendo tanto el flujo como los sedimentos hacia aguas abajo, teniendo en cuenta que ambos canales aguas abajo pueden volverse a unir en una confluencia o continuar por separado hasta desembocar en el mar. Éstas pueden producirse de forma natural o pueden ser llevadas a cabo de manera artificial mediante actuaciones humanas (canales). Un claro ejemplo en el cual se encuentran tanto bifurcaciones naturales como artificiales es en el curso de aguas bajas del río Rin, en la frontera entre Alemania y Países Bajos, donde sus diferentes ramas aguas abajo están conectadas mediante canales artificiales con el fin de mejorar la conectividad y el transporte en la zona (figura 1).



Figura 1: Mapa de la zona de aguas bajas del río Rin, con diferentes derivaciones.

Siguiendo este ejemplo, falta destacar que las zonas deltaicas son otro claro ejemplo de cómo la evolución de las bifurcaciones, la mayoría de las cuales se generan de forma natural, influyen en la morfología del terreno en diferentes zonas de la costa. Muchos de los deltas de los grandes ríos de nuestro planeta, como el del Orinoco, Venezuela (figura 2), presentan una compleja estructura ramificada con muchos canales interconectados. Por tanto, se puede también afirmar que la estructura trenzada de los ríos constituye otro caso en el que las bifurcaciones y confluencias interactúan de manera determinante en la evolución del curso del río.



Figura 2: Mapa del delta del Orinoco. Se observa el entramado de cauces con las respectivas bifurcaciones y confluencias.

La distribución de los caudales líquidos y sólidos en una bifurcación condiciona la evolución de ambas ramas, en función de la pendiente y la geometría del lecho. Este aspecto es clave y se considera una gran preocupación para la sociedad en aquellas zonas donde el río desempeña un papel fundamental en las actividades humanas. Por ejemplo, el aumento de caudal en una de las ramas puede llegar a inundar zonas de cultivo o áreas urbanas, pudiendo producir importantes pérdidas económicas y/o humanas. Por otra parte, los procesos erosivos relacionados con el flujo del agua pueden destruir infraestructuras, como por ejemplo carreteras o núcleos de población. La distribución del caudal sólido también puede provocar la deposición de sedimentos, cuando la cantidad de material transportado excede la capacidad de transporte asociada al flujo. Este hecho puede afectar de forma considerable a la navegabilidad en la entrada o aguas abajo de la rama en la que se produce dicho exceso de aporte o también puede dañar algunos dispositivos que hayan sido colocados en el río para cumplir diversas funciones (compuertas, dispositivos de medición,...).

Desde una visión medioambiental, la modificación del aporte de sedimento puede alterar de forma considerable el hábitat de plantas y animales de la zona afectada, ya que muchas de estas especies necesitan unas condiciones específicas en su ecosistema para sobrevivir. La falta o el exceso de aporte de sedimento pueden afectar el ecosistema idóneo que la fauna marina necesita para reproducirse o que precisan las plantas para realizar sus funciones vitales. Un claro ejemplo es el que se observa en la Isla Gorgona, situada 30 km al norte de la nueva desembocadura del río Patía y considerada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. El exceso de

sedimentos depositados en la zona ha afectado de forma notable los ecosistemas de los corales y su biodiversidad.



Figura 3: Ecosistema de la isla de Gorgona. Su biodiversidad está en peligro debido al exceso de sedimento que llega a la zona proveniente del río Magdalena.

Debido a estos y otros muchos motivos, la gestión del sedimento en los ríos es fundamental, a fin de poder mantener un ecosistema sostenible en el cual tanto el ser humano como el resto de especies que habitan en el planeta puedan sobrevivir. El control del transporte de sedimento y los problemas erosivos y de sedimentación es uno de los principales temas de investigación dentro de la ingeniería fluvial, debido tanto a su importancia como a su complejidad a la hora de determinar los patrones que controlan el flujo.

1.1. Motivación

1.1.1. Introducción y contexto

En cuanto al análisis del comportamiento del flujo y transporte de sedimento en derivaciones, es importante empezar diciendo que éstas pueden llegar a producir graves consecuencias que en un principio no estaban previstas. Un claro ejemplo de esta afirmación es el caso acontecido en la zona del delta del río Patía, ubicada en la costa pacífica de la provincia de Nariño, Colombia.



Figura 4: Mapa político de las provincias de la costa Pacífico de Colombia.

Dicha zona es altamente pluviosa, con unas precipitaciones anuales que oscilan entre 2580 y 5000 mm/año, lo cual provoca, entre otros factores, que este río se caracterice por el gran aporte sedimentario que arrastra, produciendo la conformación de un delta de importantes dimensiones en la desembocadura.

El Patía es el río más largo de la región pacífica colombiana y la principal vía de comunicación entre los municipios de la región del pacífico nariñense, ya que los últimos 90 km del curso fluvial son navegables. Nace en el macizo andino colombiano y tiene una longitud de 445 km por el antiguo cauce, en proceso de abandono, hasta la desembocadura en la población de Salahonda. El área actual de la cuenca es de unos 23.700 km², de los cuales aproximadamente unos 5000 km² son los que abarca el delta que se ha formado en la desembocadura. El cambio del curso fluvial producido en los años 70 modificó levemente el área de la cuenca, pasando de 20.610 a 20.845 km². El cauce actualmente principal ha pasado a ser el que sigue el curso del río Sanquianga, con 421 km hasta la población de Bocas de Satinga y 440 km más hasta la desembocadura en el Pacífico. Este río se une al Patía Viejo mediante un canal artificial: el canal Naranjo.

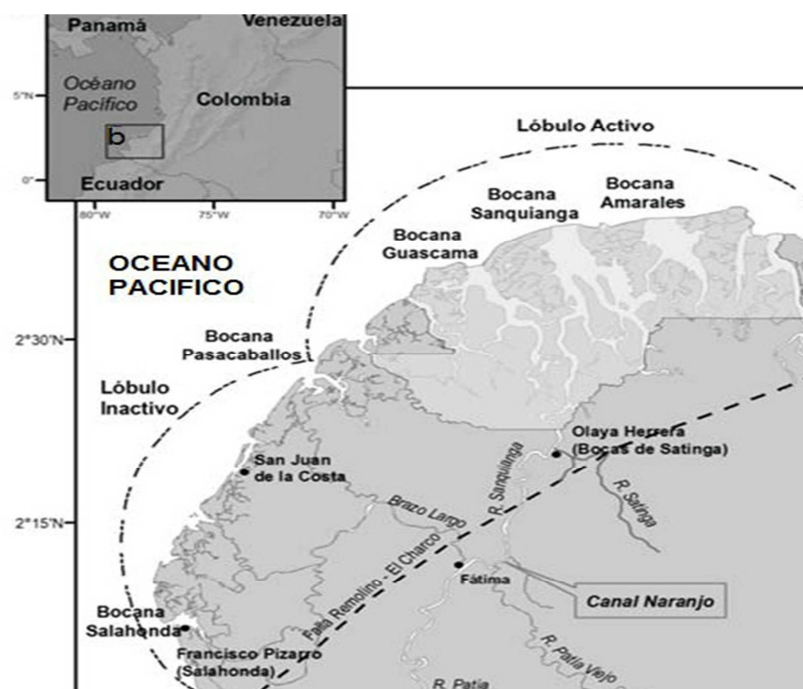


Figura 5: Definición de la zona de estudio. Se observa la unión del Sanquianga y el Patía Viejo mediante el canal Naranjo.

El caudal promedio es aproximadamente de $1500 \text{ m}^3/\text{s}$, aunque sus caudales pico suelen estar por encima de los $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$. También se caracteriza por la importante cantidad de carga sedimentaria que transporta, midiéndose en la desembocadura unos 41 millones de toneladas al año.

Estos factores, junto con las condiciones climáticas de la zona, permite la existencia de un ecosistema con una gran diversidad biológica y una vegetación abundante y densa, destacando principalmente la presencia de manglares.

Desde un punto de vista socio-económico, la población perteneciente a las provincias de la costa del Pacífico es de las más desfavorecidas en Colombia. Mayoritariamente es de raza negra (alrededor del 95%), aunque también hay algunos grupos indígenas y muy poca población mestiza. Esta mayoría se debe a la huida de la raza negra en la época de la esclavitud de las fincas de sus “amos”. La morfología de la zona les permitió refugiarse en las cuencas de los ríos y de este modo fueron repoblando la región.

La falta de recursos en la zona también provoca una escasez de infraestructuras y, en muchas zonas, las vías de comunicación son prácticamente inexistentes. Concretamente en la zona del delta del río Patía, hay una única carretera que va desde Pasto, la capital de la provincia de Nariño, hasta Tumaco, situada en la parte sur del delta y tres pistas de aterrizaje situadas en los núcleos urbanos más

importantes de la parte central del delta, pero muy poco frecuentadas por la mayoría de la población. Por tanto, el transporte fluvial actúa en muchas zonas de la región como único medio de transporte y comunicación, tomando un papel fundamental para sus habitantes.



Figura 6: Principales vías de comunicación terrestres de la parte sur de la provincia de Nariño.

Las actividades económicas más importantes de la zona son la pesca, la minería, la ganadería, la explotación de bosques para la obtención de madera y la agricultura, principalmente cacao, plátanos y cocos. La pesca tiene su principal centro de comercio y distribución en Tumaco y el municipio de Bocas de Satinga se ha convertido en el mayor centro maderero del país, produciendo aproximadamente un 30% de la madera que se comercializa en las ciudades principales del país.

Además, no hay que pasar por alto la presencia de campos clandestinos de coca, que representan una importante fuente de ingresos de difícil cuantificación. Respecto a esta circunstancia, hace falta destacar que existencia de estas plantaciones ha generado una importante red de tráfico de coca que ha provocado el conflicto armado ente el ejército nacional, las guerrillas de las FARC (Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia) y los grupos paramilitares durante los últimos años. La inaccesibilidad a zonas como la del río Patía ha servido a estas organizaciones de escudo, coaccionando a su vez a los lugareños y condicionando su estilo de vida y sus actividades.

1.1.2. La problemática del canal Naranjo

En mayo de 1972 la sociedad Maderas Naranjo inició la construcción de un pequeño canal de 1,5 metros de ancho que conectaba lo que era en aquel momento el curso principal del río Patía con otro río secundario que llegaba hasta su propiedad, con el fin de agilizar el proceso de transporte, reduciendo la distancia de viaje y evitando el transporte por mar, que era más peligroso y también más caro en temas de combustible. Inicialmente, la futura zona afectada el canal estaba separada del río Patía mediante un dique y se utilizaba un cabestrante para levantar los troncos del río y situarlos en el canal construido. Una vez allí, otro barco los llevaba hacia su destino final. Durante su construcción ya se presentaron problemas debido a las crecidas del río y en 1973 se pararon momentáneamente las obras, pero éstas fueron restablecidas, finalizando su construcción a mediados de ese año.

Aparte del afirmamiento de tierras, no se realizó ninguna medida adicional de protección, así que la fuerte crecida del río en mayo de 1974, que duró alrededor de 4 meses, rompió el dique separador y como consecuencia se formó un canal directo que unía el río Sanquianga con el Patía Viejo. Las autoridades hicieron esfuerzos por subsanar este problema y se construyó un nuevo dique de piedra, cemento y hierro, pero la siguiente avenida posterior a la construcción lo arrancó. Fueron varias las ocasiones en las que se pretendió volver a separar los dos cursos, pero las obras fueron destruidas, la mayoría de las ocasiones por las crecientes del río, aunque algunas veces también fueron los propios lugareños los que se encargaron de abortar la ejecución, ya que la presencia de la bifurcación representaba una mejora en la conectividad de diferentes zonas de la región. Por tanto, debido a la construcción del canal, a las constantes crecientes del río y a la presión que ejercieron algunos lugareños para no volver a construir la presa, se generó una bifurcación en el río Patía.

El canal funcionó de forma correcta durante los dos primeros años, pero ya se apreciaba un aumento en sus dimensiones y en 1977 ya tenía un ancho de unos 20 metros y una profundidad de 7 metros, generando un importante aumento de caudal. Durante un tiempo este hecho fue beneficioso para los habitantes de la zona, pero con el paso de los años, la nueva rama se convirtió en dominante, descendiendo el caudal del curso principal de forma progresiva. Por tanto, el nuevo tramo se convirtió en la rama principal y viceversa. Este hecho causó un grave problema a las personas que vivían aguas abajo de la bifurcación en la rama antigua, ya que se empezaron a producir problemas de navegabilidad durante los periodos donde el caudal era bajo.

Los levantamientos topográficos y batimétricos realizados en Bocas de Satinga han determinado que en la actualidad, el ancho medio de este tramo es de unos 800 metros. Con el paso del tiempo, el cauce del Patía Viejo se ha ido estrechando y actualmente tiene un ancho promedio de 100 metros.

Los estudios técnicos determinan que el cambio del curso del río Patía era probable que se produjera sin la construcción del canal Naranjo, pero su construcción produjo una aceleración en el proceso natural del río. En la figura 7 se muestra una serie de imágenes tomadas desde una vista aérea donde se puede observar la evolución comentada de forma cronológica:

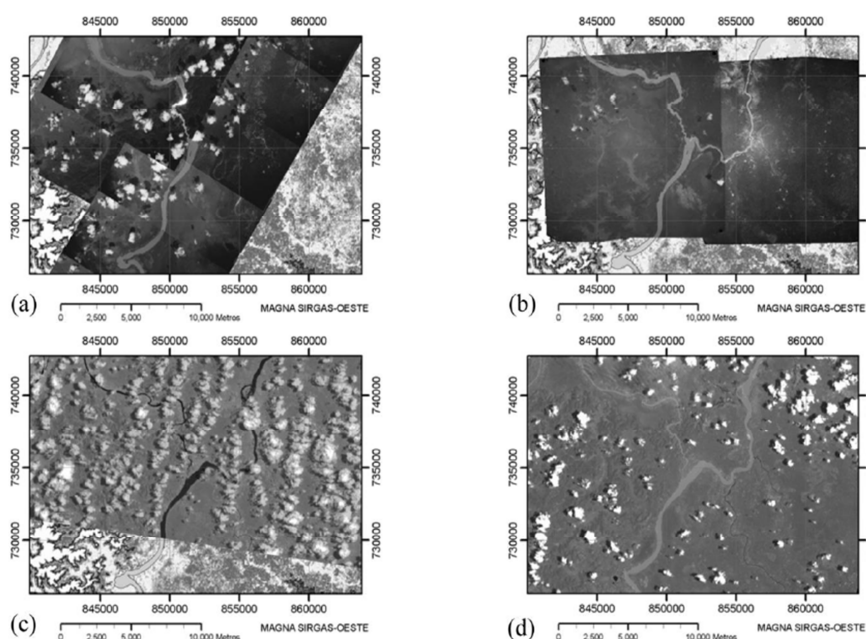


Figura 7: Evolución del río Patía en el tramo de la bifurcación. Vista aérea del tramo antes de la formación de la bifurcación en 1962 (a) y después de su formación en 1986 (b), 2001 (c) y 2008 (d).

La figura 8 muestra la situación actual de la bifurcación que se está tratando. El área de sedimentación entre ambas ramas ha producido una disminución del ángulo de desvío a lo largo de los años. Este hecho, sumado a la acumulación de troncos flotantes ha contribuido a la obstrucción de la rama antigua.



Figura 8: Situación actual de la bifurcación del río Patía. Se observa como el nuevo ramal tiene unas dimensiones muy superiores a las del antiguo. También se observa el área de sedimentación entre los dos ramales.

1.1.3. Impactos generados por el canal Naranjo

Primeramente, hace falta destacar que no todos los efectos producidos por la formación del canal Naranjo son negativos, ya que su apertura facilitó la comunicación y el comercio entre los municipios del centro de la región con los de la zona costera. Sin embargo, este apartado se centrará en las repercusiones negativas desde diferentes puntos de vista ocasionados por la modificación de la red de drenaje en la zona norte del pacífico nariñense.

Desde una perspectiva general, diez municipios fueron afectados, produciéndose grandes inundaciones que obligaron a los habitantes a trasladarse a otros municipios o a las zonas interiores de los poblados (como en Bocas de Satinga), además de desapariciones de personas que se estima que murieron ahogadas. Hace falta destacar que algunas de estas poblaciones están en inminente peligro de desaparición debido al importante cambio que ha sufrido la topografía en esta zona.



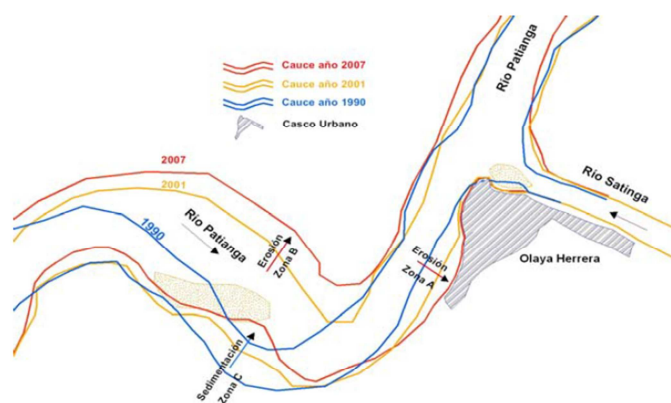
Figura 9: Catástrofe producida por la crecida del canal Naranjo en la localidad de Bocas de Satinga.

Las actividades económicas también se han visto seriamente perjudicadas, destacando los siguientes campos:

- La agricultura llevada a cabo en la zona del río Sanquianga se ha visto gravemente afectada y los cultivos ubicados en los márgenes del río han sido arrasados, estimando unas pérdidas en superficie de unas 3.000 Ha.
- Pérdida de la navegabilidad del Patía Viejo en algunas épocas del año en las poblaciones de Mosquera y Francisco Pizarro.
- El sector de la pesca se verá seriamente afectado a largo plazo debido al cambio de condiciones del flujo de agua aportado, en lo que respecta a salinidad y concentración de sedimento.

Es importante destacar, en cuanto al cambio en la morfología del cauce, las repercusiones sobre las orillas del río. En este sentido, se han observado los siguientes efectos:

- En Bocas de Satinga la orilla ha sufrido un retroceso de unos 400 metros por el margen derecho (vista aguas abajo). Esto ha supuesto la destrucción de los barrios más cercanos a la orilla y la amenaza de que pueda suceder algo similar en un futuro para el resto del municipio.



Esquema evolución del alineamiento horizontal del río Sanquianga
(Alrededores Casco urbano Municipio Olaya Herrera Nariño) U.N. 2008

Figura 10: Cambios del cauce del río Sanquianga en las últimas décadas alrededor del municipio de Bocas de Satinga . Azul (1990), amarillo (2001) y rojo (2007).

- No hay zonas fiables en las proximidades de la zona afectada (ríos Sanquianga y Patía) para el desarrollo de nuevas poblaciones o para la realización de otro tipo de actividades, como la agricultura, que ya ha sido devastada por las crecidas pasadas.

Otro de los campos que se vio afectados fue el relacionado con el transporte y las comunicaciones entre las diferentes regiones de esta zona. Como ya se ha comentado, el río Patía es la principal y en muchos lugares única vía de comunicación existente y la aparición y el aumento en cuanto a dimensiones del nuevo ramal permitió la comunicación entre los municipios de la parte alta del Patía (p.ej. Barbacoas) con los de la costa norte (p.ej. Olaya Herrera). No obstante, también produjo dificultades en cuanto a la navegación en otras poblaciones situadas en el Patía Viejo, como Tumaco (fig. 11). También hace falta destacar el importante y acelerado incremento de sedimentación en el río Patíanga aguas abajo de Bocas de Satinga, dificultando la navegabilidad de los barcos.



Figura 11: La disminución de caudal en el cauce del Patía Viejo ha causado problemas en la navegabilidad de los ríos, como por ejemplo alrededor de Tumaco, Colombia.

Por lo que respecta al medio ambiente, los cambios en la morfología de la zona producidos por la existencia de la derivación han provocado cambios tanto en la flora como en la fauna de la región. La variación en la salinidad del agua causa la muerte de algunas especies que precisan unas condiciones precisas para sobrevivir. Destacar principalmente la desaparición de manglares y de ciertas especies de animales marinos, afectando de forma destacable a la economía de la región y también la afectación sobre el hábitat de los corales de la Isla Gorgona, situada 30 km al norte de la nueva desembocadura y considerada Patrimonio de la Humanidad.

Por tanto, se debe concluir diciendo que son diversas las consecuencias que hacen que la bifurcación sea un problema tanto a nivel socio – económico como medioambiental y se precisa adoptar medidas (en la mayoría de casos estructurales)

para poder combatir dichos problemas. No obstante, hace falta volver a remarcar que el comportamiento y los cambios de posición en los ríos se producen de forma natural, por lo que el problema abordado podría haber sucedido más adelante, sin la necesidad de que el factor humano hubiera entrado en este proceso.

1.2. Introducción general al modelo y objetivos de la investigación

Desde un punto de vista geométrico, las bifurcaciones en las que una de las ramas se abre camino lateralmente mientras que la otra sigue la dirección del flujo inicial reciben el nombre de derivaciones o tomas laterales. En este sentido, el caso abordado en el río Patía encaja bien en esta definición, ya que el ángulo entre la rama antigua y la nueva ha ido evolucionando desde una configuración casi perpendicular hasta el ángulo de 35° que actualmente se ha generado. Tomando este caso como referencia, se ha decidido centrar el análisis en los efectos producidos en derivaciones, no con el fin de reproducir el caso de estudio, sino para profundizar en el análisis de los diferentes patrones que se repiten y que rigen el flujo y transporte de sedimentos en los desvíos de 90° .

Aparte de los ejemplos naturales como el que se ha descrito, esta geometría también se encuentra habitualmente en otras tomas laterales creadas por el ser humano, construidas para el riego o la comunicación. En la figura 12 se observa el esquema de una toma lateral, con las principales características generales identificadas:

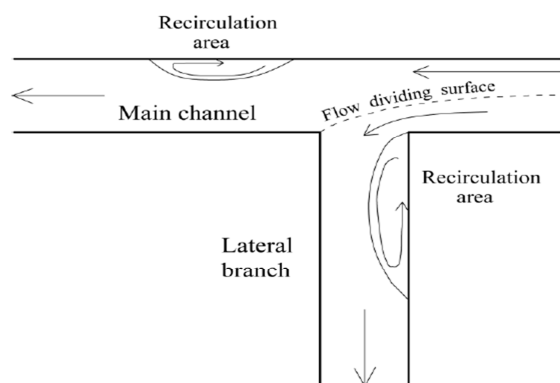


Figura 12: Esquema general de una toma lateral, en este caso con un ángulo de desvío de 90° .

La superficie de división del flujo (Flow dividing surface) separa el aporte que recibe el ramal principal del que se desvía hacia el ramal lateral. Dicha superficie tiende a abrirse hacia el canal principal (se acerca a la pared opuesta a la derivación) a medida que se acerca al lecho, donde las velocidades son bajas y el flujo se captura con más facilidad por la rama lateral. La separación del flujo se produce en la esquina

que se sitúa aguas arriba del desvío y junto a la pared adyacente, situada en la rama lateral, se forma una zona de recirculación. Este hecho produce una contracción del flujo en la pared opuesta, generándose velocidades relativamente altas. Cuando el flujo a través de la rama lateral es suficientemente alto en relación al generado en la rama principal, también se observa otra zona de recirculación en la rama principal aguas debajo del desvío, situada en la pared opuesta a éste.

Por lo que concierne al transporte de sedimentos, las conclusiones obtenidas son mucho menos claras. Sin embargo, a la hora de hacer estudios experimentales y de campo, se observa una clara tendencia a que el sedimento se desvíe hacia la rama lateral. Este fenómeno se conoce como efecto Bulle, en honor a Henri Bulle, que fue uno de los pioneros en hacer investigaciones en este campo sobre el 1926.

En cuanto a la relación entre los patrones de flujo y de sedimento y las posibles causas del desvío de sedimento hacia la rama lateral, la incerteza es todavía mayor. Por tanto, se ha optado por hacer un enfoque experimental del problema con el objetivo de evitar las posibles incertidumbres que generaría en los cálculos un modelo numérico con unas condiciones de flujo tan complejas.

Los experimentos se han llevado a cabo en condiciones de lecho móvil, a fin de poder analizar la batimetría a lo largo del canal (en especial en la zona de desvío) y su influencia en los patrones de flujo y transporte de sedimentos. También hay que destacar que los ensayos se han realizado durante un cierto intervalo de tiempo hasta que el sistema alcanza un estado aproximado de equilibrio, con el objetivo de analizar la evolución de dicho sistema e identificar su comportamiento ante diferentes condiciones de flujo.

Las variables que se han estudiado han sido, principalmente, los caudales líquidos y sólidos a la salida de cada ramal, así como los niveles del lecho y de la lámina de agua en la zona del desvío y aguas debajo de ésta.

Una vez abordado el funcionamiento del sistema y teniendo en consideración los conocimientos adquiridos hasta el momento, los objetivos de esta investigación se resumen a continuación:

- Realizar una serie de experimentos en el laboratorio sobre una simulación de canal en modelo reducido, que se diseñará y construirá previamente, con una toma lateral perpendicular a la rama principal y en condiciones de lecho móvil y registrar cómo va evolucionando el sistema hasta alcanzar las condiciones de equilibrio.

- Proporcionar datos experimentales que puedan ser de ayuda para la validación de la investigación y para futuros modelos teóricos y/o numéricos.
- Caracterizar los patrones de flujo y transporte de sedimento que tienen lugar en la zona de desvío, calcular los valores de los parámetros relativos al flujo y al transporte de sedimento y comparar los resultados obtenidos con las investigaciones anteriores, a fin de conocer si entre ellas existen concordancias, además de hacer un análisis sobre la evolución de la morfología del lecho a lo largo de los ensayos.
- Diseñar una solución para evitar los problemas ocasionados por los patrones de flujo y transporte de sedimentos en el desvío mediante la colocación de paneles sumergidos, implementar el modelo de paneles diseñado, observar las diferencias que se generan respecto al sistema sin paneles y analizar si estas diferencias son beneficiosas para resolver el problema.

1.3. Estructura del documento

El documento tiene por objetivos conocer los patrones del flujo y el transporte de sedimento en las derivaciones en río y canales mediante el uso de un modelo reducido y conseguir implementar una medida estructural (mediante el uso de paneles sumergidos) para evitar los problemas que se generan.

En el capítulo 2 expone la teoría relativa tanto de los diferentes patrones referentes al flujo y al sedimento que se producen en las derivaciones como de la fundamentación teórica en la que se basan los paneles sumergidos. Hay que destacar que esta exposición teórica se ha decidido llevar a cabo desde una perspectiva basada en la experiencia y la observación de los patrones que rigen el flujo, sin adentrarse demasiado en modelos numéricos o en un cálculo más analítico que complicaría la obtención de resultados y la toma de conclusiones acertadas.

Además, en este capítulo también se muestra el “estado del arte” relativo a los temas destacados anteriormente, mostrando algunas de las investigaciones experimentales y teorías que han adoptado algunos de los autores más destacados en este campo de la dinámica fluvial y que han servido de gran ayuda tanto para decidir el modelo que se construirá y utilizará para realizar las investigaciones como para establecer la

metodología de los experimentos y las respuestas a implementar en los diferentes ensayos que se ejecutarán.

En el capítulo 3 se expone toda la información referente al trabajo de campo realizado en el laboratorio a lo largo del desarrollo del trabajo. Ello incluye todas las tareas ejecutadas desde el inicio de la investigación. La exposición de este apartado se ha clasificado de la siguiente forma:

- Un apartado introductorio, en el cual se hace una descripción del modelo construido, explicando las diferentes partes y elementos que lo componen y su relevancia dentro del sistema.
- Una parte referente a la preparación del modelo, que engloba el proceso constructivo del canal explicado paso a paso y el procedimiento y análisis de la calibración de caudales líquidos y sólidos. Hay que destacar que, en cuanto al tiempo empleado en el desarrollo del trabajo, la planificación y ejecución del modelo físico ha sido la tarea que más tiempo ha precisado, debido a la dificultad que supone la construcción de todos sus componentes de forma correcta y a los imprevistos que han ido sucediendo a lo largo de la realización del canal y que se han debido ir subsanando para evitar futuros problemas de mayores dimensiones.
- Un apartado referente al procedimiento que se ha seguido a la hora de hacer los ensayos, explicando de forma clara y ordenada la metodología adoptada de las diferentes actividades que componen la investigación. Se detallan las tareas referentes al comportamiento del flujo y del sedimento en una derivación para distintos valores de caudal por encima y por debajo de un valor límite, con el objetivo de estudiar las diferencias que se producen en la zona de desvío y en el reparto de caudales entre los dos casos (ensayos 1 y 2). También se explican los diferentes ensayos realizados con la colocación de paneles sumergidos dentro del sistema, detallando las diferentes operaciones llevadas a cabo y las técnicas utilizadas. Se ha realizado un primer ensayo de prueba en el tramo recto del canal aguas arriba de la derivación (ensayo 3), escogiendo unos parámetros de paneles acorde a lo visto en los estudios previos para ver si su implantación produce los cambios esperados y posteriormente se han hecho las pruebas pertinentes en la zona de la derivación, observando las diferencias respecto a los ensayos realizados sin paneles (ensayo 4).

- Una parte final con los resultados que se han obtenido en los ensayos referentes al flujo y al transporte de sedimentos en la derivación tanto con la introducción de paneles sumergidos en el lecho del canal como sin ellos. Se discutirán los resultados obtenidos, con el fin de analizar si se establecen patrones similares a los de las investigaciones realizadas con anterioridad (estudios previos) y también para observar, mediante los datos obtenidos, las diferencias entre un modelo con y sin paneles. De este análisis se extraen unas conclusiones finales acerca de la investigación y también las experiencias de tipo personal sobre los diferentes aspectos llevados a cabo durante la investigación. Finalmente se añadirá un apartado con las futuras líneas de investigación, donde se expondrán algunos de los posibles experimentos que se pueden llevar a cabo más adelante para mejorar los resultados obtenidos o para verificar la importancia de parámetros que en este estudio no se han considerado y se han mantenido constantes, pero que su alteración puede llegar a provocar diferencias considerables en la dinámica de ríos.

2. Marco teórico (Estudios previos)

2.1. Comportamiento de flujo y sedimento en derivaciones

2.1.1. Consideraciones previas

Antes de entrar en la fundamentación teórica relacionada con el transporte de flujo y sedimento en derivaciones, se debe hacer una pequeña diferenciación entre los conceptos de bifurcación y derivación. Se utilizará el término bifurcación para aquellos casos en que el desvío adopte una forma de “Y”, sin tener en consideración los aportes que se producen en cada rama. En cambio, la derivación se da en aquellas situaciones en las que uno de los brazos es continuación en línea recta del cauce principal del que provienen aguas arriba, mientras que el otro fluye por uno de los laterales (con un cierto ángulo de desvío). Para estos casos, el cauce lateral toma el nombre de ramal (o rama) lateral, a diferencia del que continúa en línea recta, que adopta el nombre de ramal principal. Esta investigación se centrará exclusivamente en el comportamiento del flujo y del sedimento en derivaciones, ya que el modelo construido es un ejemplo de este tipo de casos. Una vez realizada esta consideración, se pasa a detallar los patrones que tienen lugar en los ríos o canales con derivaciones.

Como se ha explicado a groso modo en el apartado 1.3. una vez el flujo de agua llega a la zona en la que se ubica la derivación, éste puede seguir la trayectoria inicial y circular por el ramal principal o bien trazar una trayectoria curva y entrar en el ramal lateral. Lo que a simple vista parece un proceso sencillo y de fácil explicación no lo es, ya que en esta zona aparecen diferentes flujos helicoidales (conocidos como vórtices) debido a la aceleración centrífuga producida por la trayectoria curva del flujo principal, que es consecuencia de la presencia de una derivación. Si además de tener en cuenta este suceso, se considera a la vez el transporte de sedimento, el problema es todavía más complejo, ya que las características del flujo condicionarán el aporte de sedimento y la morfología del lecho, que a su vez determinan la rugosidad del lecho, que influye en las propiedades del flujo, de modo que unas variables dependen de las otras y viceversa.

En el apartado 2.1.2. se expone, de forma cualitativa, la explicación teórica relacionada con la casuística que se ha introducido y los patrones que sigue tanto el flujo como el sedimento y en el apartado 2.1.3. se aporta la información acerca de todas las investigaciones que se han hecho en este campo de la dinámica fluvial, destacando las primeras que se realizaron y algunas otras que se han considerado interesantes para el análisis del comportamiento del flujo y del transporte de sedimento en la zona de desvío.

2.1.2. Fundamentación teórica

Como ya se ha comentado con anterioridad, las derivaciones son casos particulares de una bifurcación donde uno de los ramales (el principal) sigue la misma dirección que el flujo aguas arriba del desvío, mientras que el otro ramal (el lateral o de derivación) se dirige hacia un lateral formando un cierto ángulo respecto a la dirección del flujo principal. Debido a su frecuencia en el medio, tanto de forma natural como artificial, y a los múltiples patrones característicos de comportamiento que se repiten en este tipo de geometría, las derivaciones se estudian aparte de las bifurcaciones en forma de “Y”.

Antes de pasar a la explicación acerca del comportamiento del flujo y del sedimento en la zona de desvío, es necesario presentar dos conceptos para facilitar el estudio en derivaciones. Se denomina *Relación de Toma* a la relación entre el caudal captado por el ramal lateral y el caudal correspondiente al canal principal. Su expresión es la siguiente:

$$\text{Relación de Toma} = \frac{Q_1}{Q} \quad \text{Ec (1)}$$

Donde:

Q_1 : Caudal circulante por el ramal lateral

Q : Caudal circulante total (aguas arriba de la derivación)

Por otra parte, el *Coeficiente de Captación Sólida* es la relación entre el aporte sólido captado por la derivación y el aporte total del canal principal y se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Coef. captación sólida} = \frac{T_1}{T} \quad \text{Ec (2)}$$

Donde:

T_1 : Aporte sólido dirigido hacia la derivación

T : Aporte sólido total (aguas arriba de la derivación)

Según el caso, el material aportado puede tratarse de material de fondo, en suspensión o una combinación de ambos y hace falta destacar que tanto el caudal como el aporte sólido referente al canal principal se consideran aguas arriba de la zona de desvío y que las dos definiciones planteadas se pueden considerar mediante caudales totales o unitarios (dividiendo el valor por el ancho del canal), según convenga.

En este apartado se resumirá de forma cualitativa las principales características de las derivaciones y los principales patrones que se han ido observando a lo largo de las investigaciones, destacando su relevancia dentro del sistema.

2.1.2.1. *El efecto Bulle*

El comportamiento del flujo y del sedimento en las derivaciones, conocido como efecto Bulle, es la tendencia que tiene el sedimento de desviarse hacia el ramal lateral, lo cual produce un importante desequilibrio en la distribución de sólidos a partir de este punto del sistema. Este fenómeno genera un importante problema ya que, por una parte, en la entrada de la derivación se puede producir un aporte sedimentario excesivo debido a que la cantidad de sedimento que entra por la rama es superior a la capacidad máxima que puede transportar el flujo, siendo necesaria la aplicación de medidas correctoras (como la implantación de paneles sumergidos) para paliar las consecuencias de este fenómeno.

La explicación general que explica las causas de este efecto es que, debido a las bajas velocidades del flujo en las capas más cercanas al fondo y al gradiente de presión lateral generado por la entrada del desvío, esta parte del flujo se desvía con mayor facilidad hacia la derivación. Por tanto, el flujo de la rama lateral está constituido principalmente por estas capas inferiores, que a su vez son las que acarrean el material de fondo y un alto porcentaje del sedimento en suspensión.

No obstante, lo que en principio parece un problema fácil de analizar no lo es tanto, ya que las características del flujo se vuelven realmente complejas en la zona cercana a la derivación, debido a la aparición de diversos flujos secundarios que actúan en las tres direcciones y que tienen una importante influencia en la distribución del flujo y el sedimento.

La superficie divisoria que separa el flujo que se dirige por la rama principal del que va por la rama lateral es conocida como superficie divisoria de flujo y su morfología está muy ligada a la aceleración lateral generada por el gradiente de presión transversal producida por la toma lateral. Como las velocidades en las capas superiores son elevadas en relación a las velocidades en las capas cercanas al lecho, la superficie divisoria del flujo es más extensa dentro del canal principal en las zonas inferiores que en las superiores. Este hecho explica de forma clara por qué el flujo de la rama lateral está formado principalmente por el flujo cercano al lecho aguas arriba de la derivación, aportando la mayor parte del sedimento en este ramal. La superficie de separación del flujo finaliza en la esquina inferior de la derivación, generándose una sobrepresión que provoca un aumento destacable del nivel de agua.

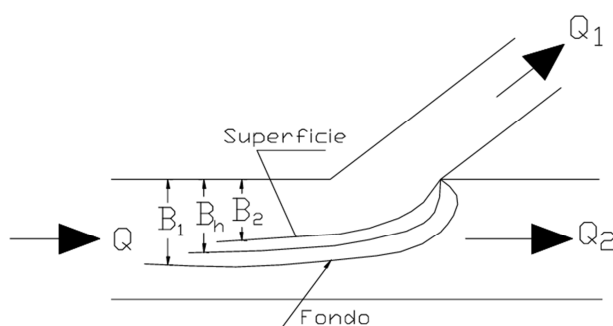


Figura 13: Esquema de la derivación con las líneas de separación de flujo a distintos niveles. Se observa como la línea correspondiente a la zona más cercana al fondo se extiende más en el canal principal que las correspondientes a capas más superiores.

Por lo que concierne al flujo en la toma lateral, hace falta señalar la formación de una zona de recirculación junto a la pared adyacente a la esquina ubicada aguas arriba, debido a la comentada separación del flujo en la esquina superior de la derivación. La

recirculación del flujo en dicha zona genera una distribución de velocidades bajas, llegando a ser negativas en algunos casos. En la figura 14 se muestra la distribución de velocidades en tres secciones de la primera región del ramal lateral, medidas por Shettar y Murthy (1996) y simuladas numéricamente por Khan (2000), donde se muestra la mencionada recirculación de flujo debida a las velocidades negativas en las zonas más próximas al fondo:

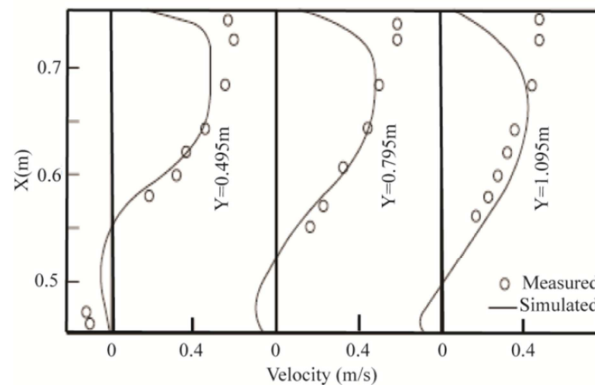


Figura 14: Resultados medidos por Shettar y Murthy (1996) y simulados por Khan (2000) relativos a la distribución de velocidades en tres secciones del canal lateral cercanas a la zona de desvío.

Esta zona de recirculación provoca que la sección de derivación por la que el flujo se dirige hacia la rama lateral disminuya considerablemente, produciendo un aumento importante de velocidades. Por lo que respecta al sedimento, la recirculación produce un aumento en la sedimentación del material a la entrada de la toma lateral, en contraposición con la zona perteneciente a la pared opuesta a la derivación, donde se encuentran las velocidades más altas que producen una mayor erosión y, consecuentemente, mayores calados de agua.

También hace falta destacar la presencia de otra posible zona de recirculación aguas abajo de la derivación en la pared opuesta a la entrada del desvío. No obstante, diversas investigaciones han determinado que dicha zona sólo se produce cuando la cantidad de flujo dirigida hacia el ramal lateral en relación con la cantidad de flujo total que proviene de aguas arriba es lo suficientemente alta, aunque el límite a partir del cual se produce la formación de esta zona no está determinado con exactitud. La presencia de esta zona de recirculación en el canal lateral produce algunos de los efectos comentados en el caso de recirculación anterior, produciendo una contracción del flujo en la pared opuesta adyacente a la zona de desvío, aumentando así la velocidad del flujo en ese sector. La figura 15 muestra de forma más clara la posición aproximada de estas zonas de recirculación:

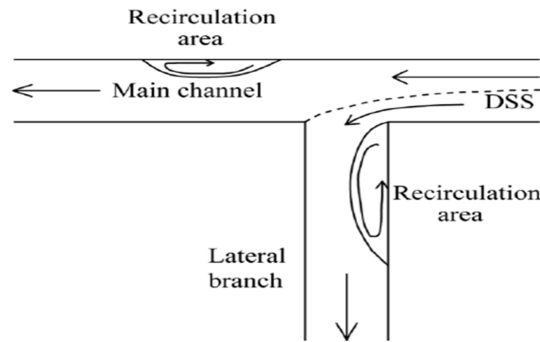


Figura 15: Posición de las zonas de recirculación en derivaciones. Se observa la aparición de éstas en la pared adyacente a la esquina de aguas arriba del desvío (ramal lateral) y en la pared opuesta a la derivación, aguas debajo de ésta (ramal principal).

Por otra parte, la interacción de la curvatura del flujo producida por la presencia de la derivación con las paredes de los dos ramales produce la aparición de dos flujos secundarios en forma de vórtices. En el ramal lateral, el impacto del flujo con la pared adyacente al vértice inferior del desvío produce el primer vórtice, que gira en el sentido horario, mientras que parte del flujo que se dirige hacia la rama principal impacta contra la pared izquierda (vista aguas abajo), generando otro vórtice, que en este caso gira en sentido antihorario. En la figura 16, se muestra de forma gráfica un esquema general de las derivaciones, en el cual se observan todos los patrones relativos al flujo en derivaciones descritos en este apartado:

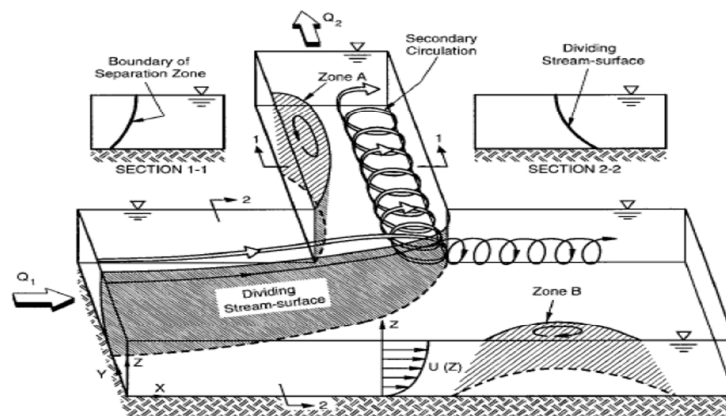


Figura 16: Esquema de los patrones relativos al flujo en derivaciones (superficie divisoria del flujo, zonas de recirculación y vórtices).

2.1.3. Estudios previos

Como parte del análisis de los patrones que acontecen en una derivación se examinará, bajo qué condiciones es posible predecir la aportación de caudal sólido en cada ramal en función del caudal líquido que pasa por cada uno de ellos. La resolución de este problema de forma analítica, considerando la capacidad de transporte de cada

uno de los tramos en función de las condiciones del sistema, proporciona unos resultados calculados que difieren de forma sustancial de los resultados observados o medidos. A continuación se explican de forma sintética algunas de las investigaciones experimentales que se han realizado, que han ido encaminadas al conocimiento del comportamiento del flujo, pero sobre todo el sedimento, en derivaciones y a determinar qué variables influyen en mayor o menor medida al ingreso de sólidos en el ramal lateral.

2.1.3.1. Investigaciones de Thoma

Previo a la explicación de esta investigación, hace falta destacar que durante muchos años no se conoció de forma clara las consideraciones teóricas o experimentales que eran necesarias para resolver el problema de impedir o disminuir la entrada de sólidos en una derivación. En general, lo más común era resolver el problema mediante la elevación del umbral de captación del ramal lateral, con lo cual se obtenían buenos resultados, siempre y cuando el umbral pudiera mantenerse libre. No obstante, esta medida supuso problemas en ríos como el que se ha descrito en la motivación de la investigación, por lo que el estudio del comportamiento del flujo y del sedimento en una derivación fue necesario para poder implementar futuras medidas correctoras que funcionaran mejor que las que en ese momento se estaban ejecutando.

Las primeras investigaciones experimentales sobre la distribución de sólidos de fondo fueron realizadas por H. Thoma en 1923, a partir de los estudios de una captación en el Mittel Isar, ubicada aguas abajo de Munich, Alemania. Los experimentos se llevaron a cabo en un pequeño canal de 4 metros de largo, 0,3 metros de ancho y 0,20 metros de profundidad, con una sección del ramal lateral igual a la del ramal principal. Por tanto, la aportación de caudal líquido en las dos ramas era la misma. Las primeras pruebas fueron realizadas con un ángulo de 30° y con el borde interior redondeado. En estas condiciones se observó que el 85,2% del aporte sólido de fondo se dirigía hacia la derivación. Posteriormente, se realizaron pruebas similares con un ángulo de 90° y borde interior sin redondear y la aportación sólida de fondo en la derivación aumentó, siendo ésta un 92,1% del total, un resultado superior al obtenido en el experimento anterior pero bastante parecido. Los esquemas generales de ambos estudios se observan en las figuras 17 y 18:

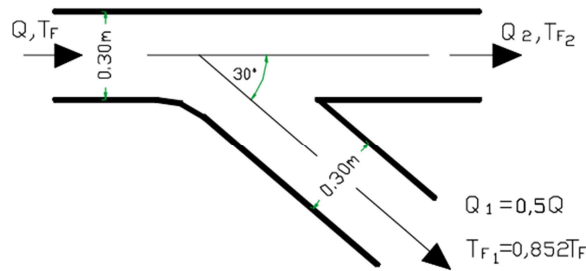


Figura 17: Primeras pruebas realizadas por H. Toma, con un ángulo de derivación de 30° y borde interior redondeado.

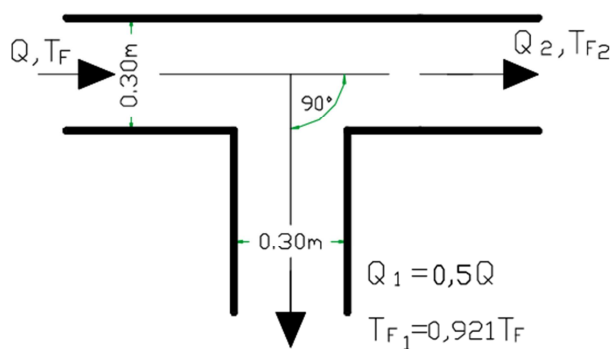


Figura 18: Segunda tanda de experimentos de H. Toma, esta vez con un ángulo de desvío de 90° y borde interior sin redondear.

Los resultados de Thoma fueron de vital importancia, ya que permitieron establecer experimentalmente que en una bifurcación el material de fondo tiene una elevada tendencia a dirigirse hacia el ramal de derivación. También realizó los mismos experimentos con materiales de bajo peso específico, obteniendo resultados muy similares. Esta problemática fue investigada también por Rehbock en el laboratorio de hidráulica de Karlsruhe y definió que la tendencia de los sólidos a dirigirse hacia la derivación era debida a la pendiente transversal que se genera en el lecho debido a la existencia de la derivación.

2.1.3.2. Investigaciones de Bulle

En 1926, H. Bulle realizó una serie de experimentos en el laboratorio de hidráulica de Karlsruhe, Alemania, con el objetivo de profundizar en el conocimiento de la distribución de sedimentos de fondo en una derivación, mejorando los estudios que se habían realizado con anterioridad y estableciendo las posibles causas de los patrones que acontecían. Gracias a las investigaciones previas de Thoma, Bulle partió de la base de que no existía la misma relación entre la distribución de caudales líquidos y

sólidos de fondo y que tampoco se obtenían resultados aceptables si se realizaba un cálculo teórico en base a las capacidades de transporte de cada ramal. Por tanto, la relación de toma y el coeficiente de captación sólida no tenían porque ser necesariamente iguales.

La mayoría de las investigaciones realizadas por Bulle se llevaron a cabo en un canal rectangular de 0,2 metros de ancho en ambos ramales, con una velocidad media del flujo de 0,37 m/s y un caudal de 5 L/s. Bulle amplió el rango de ángulos estudiados, siendo éstos 30°, 60°, 90°, 120° y 150° (la investigación se inició con un ángulo de derivación de 30° y fondo rígido). En la mayoría de los experimentos, la relación de toma inicial fue de 0,5 (mismo caudal por los dos ramales).

Las experiencias de Bulle acerca del comportamiento del flujo mostraron que la capa más cercana al lecho de 1 cm de espesor se dirigía en su totalidad hacia el ramal lateral, ya que en la zona cercana al fondo, las velocidades son mucho menores que en las capas más cercanas a la superficie.

Otro descubrimiento fue la aparición de áreas de recirculación en determinadas zonas cercanas a la derivación. Como se puede observar en la figura 19, éstas aparecen en el margen derecho del ramal lateral (vista aguas abajo), ocupando prácticamente la mitad de la superficie del ancho del canal y en el margen izquierdo del canal principal, con unas dimensiones más reducidas. También se observó, alrededor del vértice de desvío (punto S), una zona de erosión del lecho. Por último, hace falta destacar que en el canal principal se generó un cierto aumento de la pendiente transversal.

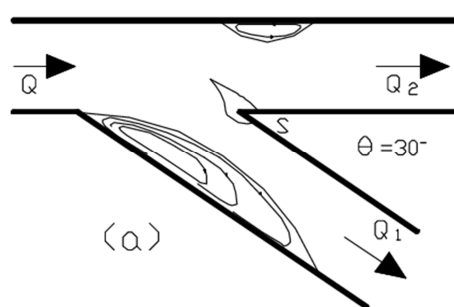


Figura 19: Esquema de la zona de la derivación en los experimentos de H. Bulle, con las áreas de recirculación de flujo y los vórtices generados.

Como se ha comentado anteriormente, Bulle hizo ciertas modificaciones en algunos de los parámetros, con el objetivo de analizar su relevancia. Hizo el mismo experimento para los otros cuatro ángulos mencionados y también hizo cambios en el redondeo del borde interior. Tanto con la variación del ángulo como con el cambio de la morfología

del borde interior se obtuvieron resultados con pequeñas variaciones que no modificaron de forma relevante los resultados finales.

Después de estas investigaciones, Bulle realizó experimentos cambiando el material de fondo, utilizando arena de 1,2mm de diámetro máximo. Para una relación de toma inicial de 0,5 los resultados fueron los siguientes:

Tabla 1: Tabla resumen de los resultados obtenidos referentes al coeficiente de captación sólida en función del ángulo de desvío adoptado.

Ángulo derivación (°)	Tf1/Tf (%)
30	97
60	96
90	90
120	87,5
150	92

Los ensayos realizados inicialmente se realizaron durante un intervalo de tiempo de 45 minutos y posteriormente se pasó a intervalos de 75 minutos, introduciendo arena en el modelo. La modificación de la duración de los ensayos no produjo diferencias destacables.

Finalmente, también realizó variaciones en la relación de toma, modificando la sección del ramal lateral. En el siguiente diagrama se muestra el caudal sólido que circula por cada rama (T_F) en función de la distribución de caudal líquido (Q):

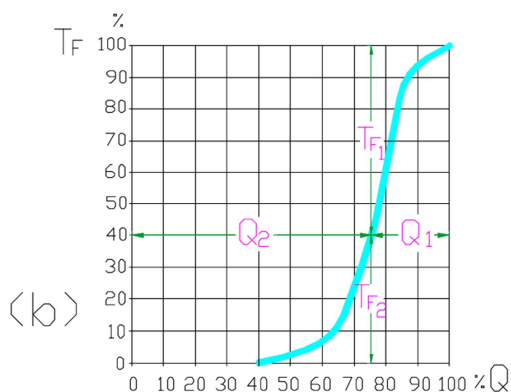


Figura 20: Diagrama realizado por H. Bulle después de realizar los experimentos en los cuales hizo modificaciones en la relación de toma. Se observa la aportación perteneciente a cada rama del modelo en función del caudal circulante por cada rama.

Gracias a las experiencias realizadas y en función de los resultados obtenidos, Bulle obtuvo una serie de conclusiones, que son:

- En las derivaciones, el flujo perteneciente la capa más cercana al lecho se dirige mayoritariamente hacia el ramal lateral.
- La tendencia del material de fondo de dirigirse hacia la derivación es debida a las bajas velocidades que tiene el flujo en esta zona y también por formación de una cierta pendiente transversal en la zona de la derivación. Al aumentar el caudal derivado o el ancho de la rama lateral, esta tendencia aumenta. También hace falta destacar que a medida que aumenta el caudal circulante, la cantidad de material sólido que se dirige hacia la derivación disminuye.
- En las zonas próximas a la derivación se forman flujos helicoidales y se generan zonas de acumulación y erosión de material. En la entrada de la rama lateral se genera una zona de recirculación cuyas dimensiones varían en función del ángulo de derivación y de la morfología de la derivación (borde interior redondeado o abrupto). Dicha zona reduce la sección del canal y es la causante de la formación de la pendiente transversal en la zona de la derivación.
- La captación de sólidos se ve modificada por los ángulos de derivación, produciéndose el mayor y menor desequilibrio cuando los ángulos son de 90° y 120° , respectivamente. No obstante, las variaciones no son especialmente significativas y se mantienen dentro de un rango de valores bastante reducido.
- La modificación de la morfología del borde interior de la derivación no provoca diferencias importantes en relación a la distribución de sedimentos. Pese a ello, hace falta destacar que el borde redondeado provoca la reducción del vórtice que se genera en la entrada de la derivación, provocando una disminución del caudal sólido captado.

Con las experiencias de Thoma y de Bulle quedó perfectamente demostrado que las aportaciones de caudal sólido y líquido se distribuye en proporciones diferentes. A partir de este punto, se denominará Efecto Bulle a la tendencia que tienen las capas más cercanas al lecho, cargadas de sedimento, de dirigirse hacia el ramal de derivación.

2.1.3.3. Investigaciones de Dancy

En 1927, A. G. Dancy realiza en Iowa ciertas investigaciones experimentales sobre derivaciones con la finalidad de conocer la distribución de sedimento en función del tipo de transporte (de fondo o de suspensión). Para ello, realizó un modelo en el cual

tanto el ramal principal como el lateral eran de sección rectangular de 0,15 metros de ancho y 0,125 metros de altura. En la figura 21 se muestran los resultados obtenidos por Dancy, en los cuales se grafica la relación entre la relación de toma y el coeficiente de captación, en función de un parámetro adimensional α y para un ángulo de derivación de 30°. El parámetro adimensional α se obtiene mediante la fórmula:

$$\alpha = \frac{2,5 * w}{V^*} \quad \text{Ec (3)}$$

Donde:

w: velocidad de caída de las partículas.

V*: velocidad de corte.

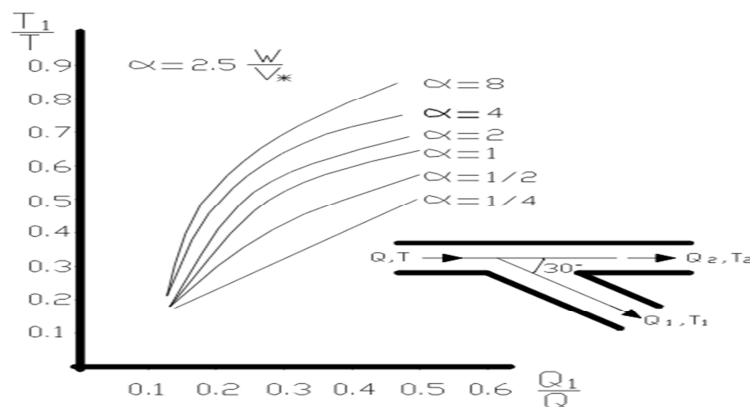


Figura 21: Gráfica de los resultados obtenidos por Dancy, donde se muestra la relación entre la relación de toma (Q_1/Q) y el coeficiente de captación sólida (T_1/T), para diferentes valores del parámetro adimensional α .

El análisis de los resultados indicó que, para valores altos de α , que corresponden a altas concentraciones en la zona cercana al fondo, la distribución de sólidos tiene tendencia a producirse según los patrones del efecto Bulle (mayor parte del sedimento se dirige hacia la derivación). Sin embargo, en aquellos casos donde el parámetro α tiene un valor bajo, que corresponden a una distribución relativamente uniforme del material en suspensión en toda la sección transversal, el coeficiente de captación sólida tiende a ser igual que la relación de toma.

2.1.3.4. Investigaciones de Vogel

En 1934 H. D. Vogel hizo una serie de experimentos sobre el comportamiento de las derivaciones en el Waterways Experiment Station de Vicksburg, Estados Unidos.

Vogel continuó la línea de investigación de Dancy, teniendo en consideración, además del transporte de fondo, el transporte en suspensión. Para ello utilizó un canal de 0,61 metros de ancho, con una velocidad media del flujo de 0,3 m/s.

Los primeros experimentos fueron realizados con un ángulo de derivación de 30°, con una repartición igual de caudales. Los resultados obtenidos concluyeron que, para arena fina, el 76% del material sólido se dirigía hacia la derivación, mientras que para un material más fino y con las mismas condiciones del experimento anterior, solamente se introducía el 55% del material.

Además, también realizó modificaciones en la tipología del canal, utilizando una sección circular de 0,61 metros de radio en el ramal principal y de 0,305 metros de radio en el ramal lateral, con un ángulo de derivación de 30°. Los resultados obtenidos mostraron que, para arena gruesa, la relación de toma era de 0,36 y el coeficiente de captación de 0,65, mientras que para una arena fina la relación de toma era de 0,5 y el coeficiente de captación de 0,52.

Los estudios de Vogel sirvieron para demostrar que, una vez más, la distribución líquida y sólida no sigue la misma proporción. No obstante, la disminución del diámetro del sedimento provoca que un mayor porcentaje del material se encuentre en suspensión, haciendo que la relación de toma y el coeficiente de captación tiendan a ser iguales. Por tanto, en una derivación, el material sólido muy fino transportado en suspensión tiende a distribuirse en la misma proporción que los caudales líquidos.

2.1.3.5. Investigaciones de Cristiani y Benini

El ingeniero M. Cristiani realizó una serie de investigaciones en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Padua acerca de las derivaciones, aunque desgraciadamente sus experimentos quedaron inacabados debido a su muerte durante la Segunda Guerra Mundial. A pesar de este hecho, sus resultados fueron presentados por Benini, ingeniero del mismo laboratorio, que llevó a cabo un crítico y exhaustivo trabajo acerca de algunas de las teorías sobre derivaciones que se habían desarrollado hasta 1952, y que más adelante ampliaría con sus propias experiencias en 1955.

Los experimentos de Cristiani se realizaron en un canal principal de sección trapezoidal de 0,28 metros de ancho en la base y un talud 1:4 y un canal de derivación de sección rectangular de 0,1 y 0,206 metros de ancho (estos valores corresponden, respectivamente, a la primera y segunda serie de investigaciones), con un ángulo de

derivación constante de $26^{\circ} 45'$. Con los resultados obtenidos por Cristiani, Benini planteó las siguientes conclusiones:

- El coeficiente de captación sólida aumenta exponencialmente a medida que aumenta la relación de toma.
- La influencia de la velocidad del flujo no es un factor a considerar necesariamente, a no ser que la velocidad sea suficientemente grande como para poner en suspensión parcial o totalmente el sedimento.
- El coeficiente de captación sólida disminuye a medida que se aumenta el diámetro del sedimento.

Las propias investigaciones de Benini siguieron el camino de su predecesor, investigando el comportamiento en derivaciones mediante el uso de un canal principal de sección rectangular de 0,3 metros de ancho y 0,2 metros de profundidad y un canal de derivación rectangular de ancho variable (se hicieron experimentos para anchos de 0,1 y 0,17 metros), en el cual el ángulo de derivación era variable, siendo los valores escogidos de 30° , 60° y 90° . Destacar también que se seleccionaron dos velocidades de flujo diferentes, siendo éstas de 0,47 y 0,73 m/s y que se empleó el mismo material sólido a lo largo de toda la serie de experimentos. En todos los ensayos, el sedimento transportado se comportó como material de fondo y Benini extrajo las siguientes conclusiones:

- La influencia del ángulo de derivación respecto al coeficiente de captación sólida no acaba de estar bien determinada.
- La variación del ancho en la derivación no produce variaciones destacables sobre el coeficiente de captación sólida.
- El peso específico y el diámetro de las partículas tiene poca relevancia sobre el coeficiente de captación sólida.

2.2. Gestión del sedimento a la entrada de una derivación: Paneles sumergidos

2.2.1. Introducción

Una vez se ha mostrado los importantes problemas que genera el sedimento debido al desequilibrio del reparto por ambos ramales, se llega a la conclusión de que son necesarias ciertas medidas correctoras para poder solucionar este inconveniente, con el fin de alcanzar un sistema más equitativo en cuanto a la distribución de material, evitando ciertas situaciones como la explicada en la motivación del estudio en el apartado 1.2. Teniendo esto en cuenta, varios han sido los métodos que se han implementado para evitar o minimizar la entrada del sedimento en el ramal de derivación y su posterior deposición a la entrada.

Una primera consideración a tomar fue la ubicación precisa del ramal lateral en relación con la geometría de la rama principal. Los resultados de las diferentes disposiciones se muestran en la figura 21:

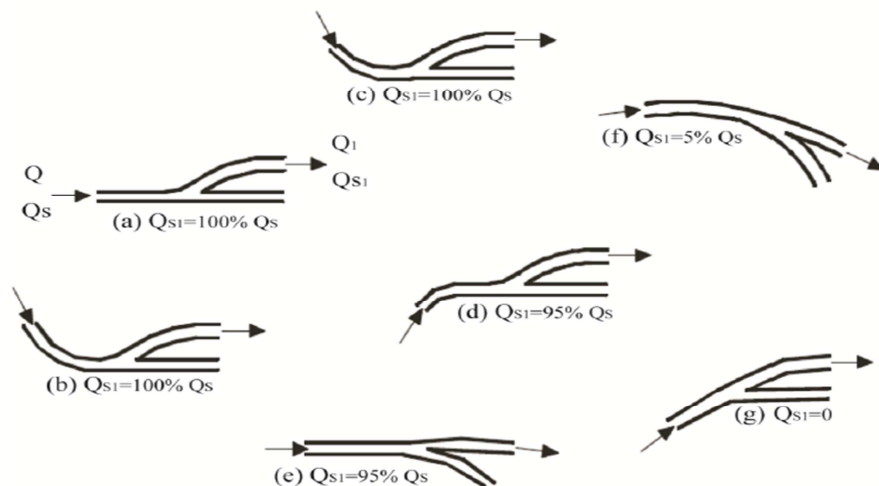


Figura 22: Porcentaje de sedimento desviado hacia el ramal lateral en función de la posición y orientación de éste en relación al curso principal.

En los cinco primeros casos, se observa que todo el sedimento o una gran mayoría es capturado por el ramal lateral, mientras que en los casos en los que éste se ubica en la zona exterior de la curva y en la zona cercana a su inicio, todo el sedimento o la mayor parte se dirige hacia el ramal principal. La explicación de este suceso es que, en las dos últimas geometrías, el ramal lateral toma importancia y se convierte en el canal principal, mientras que el principal es el que toma la dirección lateral.

Destacar que dicha medida supuso una disminución del aporte de sedimento por la derivación en algunas investigaciones (Brink 2004, Rocha 2005), pero también es cierto que en muchos casos no es posible modificar la situación de la derivación, por lo que es necesario optar por la implementación de medidas estructurales para resolver el problema.

En este apartado se explicará de forma cualitativa las características principales de los paneles sumergidos, los efectos que produce, con su correspondiente explicación física y los diferentes estudios previos que se han llevado a cabo hasta alcanzar una propuesta eficiente, aplicada actualmente en muchas situaciones de la vida real.

2.2.2. Fundamentación teórica

Una de las estrategias más estudiadas tanto de forma numérica como experimental ha sido el uso de paneles sumergidos (Odgaard 2009). Dichos paneles son placas delgadas de direccionamiento del flujo, diseñadas para modificar las características de éste cerca del fondo del río y redistribuirlo, junto con el material sólido, a través de la sección de un canal.

La idea fundamental en la que se basa esta estrategia consiste en la generación de una circulación secundaria, que altere la magnitud y la dirección de las tensiones de fondo en el lecho, contrarrestando los efectos del flujo que había inicialmente y causando un cambio en la distribución de velocidad, en la profundidad y en el transporte de sedimentos en la zona afectada. Como resultado, el material sedimenta en una parte de la sección transversal del canal y se erosiona en otra. En la figura 23 se muestra el comportamiento del flujo generado por el panel y en la figura 24 los cambios que provoca en el perfil del lecho del río en una sección:

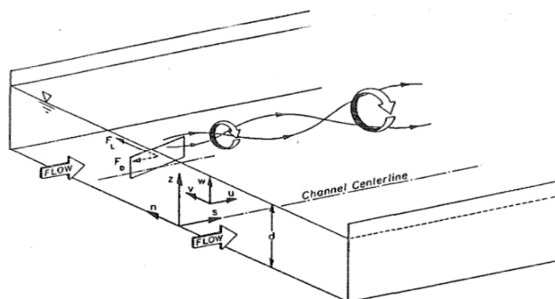


Figura 23: Comportamiento del flujo inducido por los paneles sumergidos. Se observa el vórtice generado debido a la diferencia de presiones entre las caras del panel.

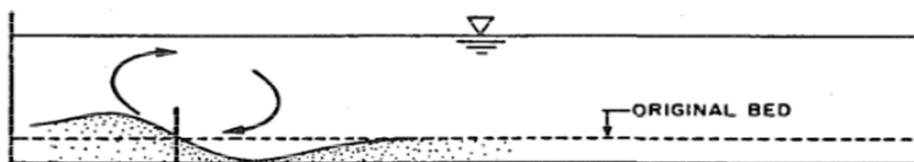


Figura 24: Efectos producidos por los paneles sumergidos en el lecho del río. El vórtice generado coloca el sedimento a un lado de la sección, produciendo una depresión al otro lado.

Las características del flujo alrededor de un panel sumergido son consecuencia de la sobrepresión que se genera en la pared frontal a la dirección del flujo y de la subpresión que se genera detrás del panel. Los efectos de este campo de presiones generado se visualizan mediante un flujo helicoidal en forma de vórtice que se extiende aguas abajo del panel hasta una cierta distancia.

Inicialmente, estos paneles se utilizaron en las zonas de curvas de los ríos, a fin de minimizar los problemas erosivos que se producían en la zona exterior de la curva, produciendo ciertas problemáticas para las actividades humanas. La solución adoptada fue orientarlos según un cierto ángulo respecto a la dirección del flujo principal, produciéndose un flujo secundario que contrarrestaba el flujo secundario generado de forma natural. El flujo secundario producido por los paneles también lleva asociado un transporte de sedimentos transversal, que logra equilibrar la erosión producida por la fuerza centrífuga sobre la zona exterior de una curva.

Uno de los objetivos de esta investigación es conocer los efectos producidos por los paneles sumergidos en una derivación. Hace falta destacar que dichos efectos generados por la curvatura de un cauce son parecidos a los de una derivación y, por tanto, lo comentado hasta el momento también sirve de gran ayuda para el caso a analizar. No obstante, cuando se implementa esta medida en una toma lateral, el objetivo principal de los paneles es generar una pendiente transversal en la zona próxima al desvío que reduzca los niveles del lecho, consiguiendo revertir la tendencia del flujo a dirigirse hacia la derivación y así reducir el aporte de sedimento. En la figura 25 se muestra el comportamiento de los paneles en relación al flujo transportado en un canal con toma lateral:

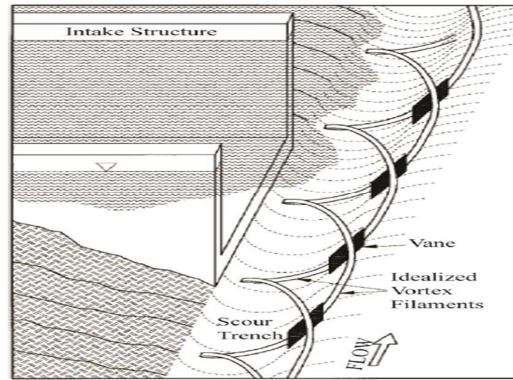


Figura 25: Esquema del flujo helicoidal producido por los paneles y el consecuente formación de la pendiente transversal (línea punteada) en la zona cercana a la derivación.

2.2.3. Estudios previos

Las dimensiones de los paneles sumergidos y su colocación también han sido objeto de estudio en los últimos años, a fin de mejorar su rendimiento en relación con los patrones del flujo. Son muchas las teorías acerca del dimensionamiento de los paneles, por lo que en el presente documento se analizarán principalmente los estudios realizados por Jacob Odgaard (de hecho, los paneles sumergidos también son conocidos como paneles de Odgaard, debido a que fue el primero en iniciar experimentos en este campo de la dinámica fluvial y a la importancia de las conclusiones extraídas de sus investigaciones). Además, también se hará referencia a otras investigaciones utilizando la técnica de paneles en modelos con derivación.

Los principales parámetros a determinar a la hora de dimensionar los paneles se detallan en la figura 26:

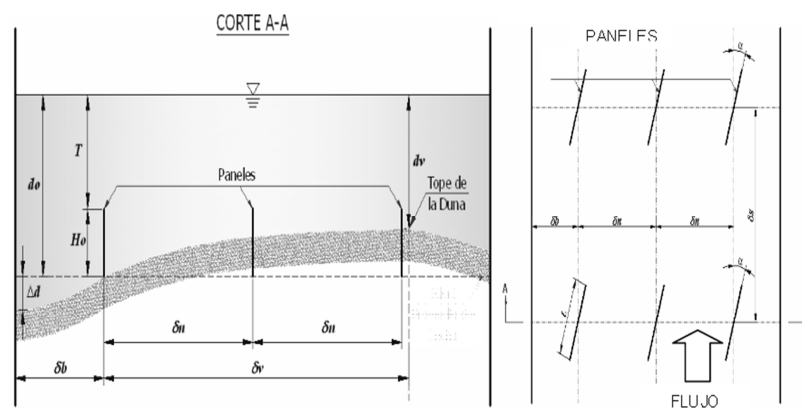


Figura 26: Vistas en alzado y planta de la disposición de paneles en grupos de tres, destacando los principales parámetros de diseño.

2.2.3.1. Investigaciones de Odgaard

Investigaciones de Odgaard y Kennedy

Las primeras investigaciones llevadas a cabo sobre el dimensionamiento de los paneles sumergidos fueron realizadas por Odgaard y Kennedy en 1983, en el Instituto de Investigación Hidráulica de Iowa (IIHR), USA. Los experimentos se realizaron en un canal con curvatura y con lecho móvil, con un diámetro de sedimento de 0,3 mm, un caudal circulante de 0,154 m³/s y un ángulo de derivación de 15°. También se fijó que el nivel de agua del canal tenía que ser tres veces la altura de los paneles ($d = 3H$). Los objetivos de estos experimentos eran investigar acerca de las consecuencias que tenía la implantación de paneles sumergidos en el tramo curvo del canal, determinando la topografía del lecho y las distribuciones de velocidades.

Los resultados determinaron que las corrientes secundarias del flujo producidas por la curvatura del canal eran anuladas al colocar los paneles y también se observó una disminución en la velocidad media del flujo y una conservación de la rugosidad del canal en la zona donde se colocaron las placas.

Investigaciones de Odgaard y Lee

En 1984, Odgaard y Lee realizaron en el IIHR otra serie de investigaciones en un modelo con curvatura de 250 pies de longitud, 8 pies de profundidad y 43 pies de radios de curvatura. El objetivo de esta investigación fue determinar el funcionamiento de los paneles sumergidos para el control del flujo y para la protección del lecho, observando las consecuencias que éstos generan en la profundidad y la distribución de velocidades en la parte exterior de la zona de curvatura.

De este estudio se determinaron los parámetros de diseño para el correcto funcionamiento de los paneles, que a continuación se detallan:

$$0,2 < \frac{H}{d} < 0,5 \quad \text{Ec (4)}$$

$$0,1 < \frac{H}{L} < 0,5 \quad \text{Ec (5)}$$

$$L = 3H \quad \text{Ec (6)}$$

$$10^\circ < \alpha < 15^\circ \quad \text{Ec (7)}$$

$$\delta_n \leq 2d \quad \text{Ec (8)}$$

En 1986, Odgaard y Spoljaric realizaron experimentos en el IIHR en relación a la influencia de los paneles sumergidos en el transporte de flujo. Para ello, utilizaron dos canales diferentes, ambos sin zona de curvatura. El primero tenía unas dimensiones de 0,61 metros de ancho y 9 metros de longitud, con un diámetro de sedimento de 0,3 mm, un caudal de $0,0316 \text{ m}^3/\text{s}$ y una velocidad media del flujo de $0,082 \text{ m/s}$. En cuanto a las características de paneles, se utilizaron paletas aisladas (grupos de un solo panel) de 21 cm de longitud y 8,5 cm de altura, con un ángulo de desviación respecto a la dirección del flujo de 15° . El nivel de agua estaba alrededor de los 17 cm. Para la segunda tanda de experimentos, se utilizó un canal de 1,83 metros de ancho y 18 metros de longitud, con un diámetro de sedimento de 0,4 mm, un caudal de $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$ y una velocidad media del flujo de $0,081 \text{ m/s}$. También se modificaron las características de los paneles, colocándose éstos en grupos de distinto número ($L = 22,9 \text{ cm}$; $H = 9,4 \text{ cm}$; $\alpha = 15^\circ$). En este caso, el calado era de 15 cm. Para ambos estudios, se utilizó un canal de pendiente baja ($S_0 = 0,00075$).

Como en los casos anteriores, el propósito principal era encontrar la idónea morfología y disposición de los paneles en función de las condiciones descritas anteriormente y comprobar si dichos paneles tenían la capacidad suficiente para mantener la profundidad de navegación en ríos, interpretando las diferencias entre las dos tandas de experimentos. Además, también se pretendía verificar los experimentos anteriores en cuanto a niveles del lecho y distribución de velocidades.

Las conclusiones extraídas por Odgaard y Spoljaric fueron las siguientes:

- Las modificaciones en la profundidad del lecho inducidas por la colocación de paneles sumergidos es consecuencia de la aparición de velocidades en el sentido transversal cerca del lecho, llegando a ser más influyente que la componente de velocidades en el sentido longitudinal. También hace falta destacar que la redistribución del sedimento producida no altera en absoluto las condiciones generales del modelo (exceptuando la zona afectada por los paneles)
- Aunque la morfología de las secciones transversales afectadas por la presencia de los paneles se haya visto modificada de forma evidente, el área de dichas secciones (en cuanto a la magnitud del valor) no se ve modificada.

- El ángulo óptimo de colocación de los paneles es de 15°, produciendo unas modificaciones en los niveles del fondo hasta del 10%.

Investigaciones de Odgaard y Mosconi

En 1987, Odgaard y Mosconi realizaron las investigaciones en el IIHR sobre un canal con zona de curvatura y pendiente baja ($S_0 = 0,0007$), con un diámetro de sedimento de 0,45 mm. Respecto a los paneles, la longitud de éstos era de 30,5 cm y se utilizó una relación $H/d = 0,3$ para determinar su altura. El objetivo de esta investigación fue diseñar un sistema base de paneles que corrigiera los efectos producidos por el flujo en espiral que arrastraba el sedimento hacia el exterior de la curva e implementarlo en un tramo del río Nishnabotna, Iowa, observando si el rendimiento de los paneles es el adecuado.

El resultado final de esta investigación fue la determinación de los parámetros referentes a la morfología y colocación de los paneles que resultaban ofrecer buenos resultados una vez implementados en el caso real del río Nishnabotna. Éstas fueron las conclusiones extraídas:

- Características de los paneles

$$0,2 < \frac{H}{d} < 0,5 \quad \text{Ec (9)}$$

$$L = 3H \quad \text{Ec (10)}$$

$$10^\circ < \alpha < 15^\circ \quad \text{Ec (11)}$$

$$\text{Separación entre paneles: } \delta_n \leq 2d \quad \text{Ec (12)}$$

- Los resultados obtenidos produjeron una disminución de las pendientes transversales de las secciones estudiadas al menos un 50% de su valor, provocando una disminución de velocidades en las capas más cercanas al lecho entre un 10–20% y consiguiendo que las velocidades más elevadas se obtuvieran en el centro de la sección (en contraposición con el sistema sin paneles, donde las velocidades máximas se obtienen en las zonas laterales).

Investigaciones de Odgaard y Wang

En 1991, Odgaard y Wang hicieron tandas de experimentos en el IIHR con el propósito de establecer las bases teóricas y las aplicaciones que los paneles pueden tener en relación a la gestión del sedimento fluvial.

En los primeros experimentos, llevadas a cabo tanto para modelos de canal recto como con curvatura, se utilizó un parámetro de Shields de 0,056 y las relaciones siguientes referentes a las características de los paneles:

$$\frac{H}{d} = 0,3 ; \frac{T}{d} = 0,5 ; \frac{d}{b} = 0,5 ; m = 4 ; k = 0,4 ; \alpha = 20^{\circ} \quad \text{Ec (13)}$$

Con esta disposición, se extrajo una fundamentación teórica que concluía que los paneles sumergidos producían unos cambios muy significativos en la distribución de velocidades y en los calados y la morfología del lecho.

Seguidamente, realizaron otra investigación sobre canales rectos y con curvaturas, con las siguientes características:

Tabla 2: Características de los canales empleados en las investigaciones de Odgaard y Wang (1991).

Canal con curvatura	Canal recto
b = 1,94 m	b = 2,44 m
y = 0,6 m	y = 0,6 m
L = 20 m	L = 20 m
r = 13,1 m	D ₅₀ = 0,41 mm

Después de los experimentos, se concluyó que los paneles sumergidos eran una buena técnica de control de sedimentos. No obstante, también se observó que algunos de los parámetros medidos con los cambios inducidos por la corriente generada, tales como los esfuerzos transversales de fondo, diferían de forma significativa con los calculados mediante la teoría realizada con anterioridad.

En 1993 realizaron otra serie de pruebas con un modelo de canal recto con los siguientes parámetros relativos a los paneles:

$$\frac{H}{L} = 0,5 ; \frac{H}{d} = 0,5 ; \alpha = 25^{\circ} \quad \text{Ec (14)}$$

El objetivo de este nuevo experimento consistía en observar el comportamiento del flujo a través del canal y colocando conjuntos de paneles sumergidos en uno de los lados a lo largo de toda su longitud. También se precisaba comparar los resultados obtenidos calculados y medidos respecto a la componente transversal de velocidades.

Los resultados finales determinaron que la componente transversal de velocidad inducida por los paneles se puede representar mediante un vórtice que produce efectos sobre el flujo alrededor de la zona en la que se colocan los paneles (en este caso, a lo largo de todo el canal).

En 1996 se hizo otra comparación entre los resultados medidos y calculados en un canal recto con una derivación. Las características del modelo eran las siguientes:

$$d_0 = 2,7 \text{ m} ; u_0 = 0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} ; D_{50} = 0,3 \text{ mm} ; Fr = 7,4 ; m (\text{parámetro de resistencia}) = 3 \quad \text{Ec (15)}$$

Con los resultados obtenidos y su posterior comparativa, se demostró la validez de los paneles sumergidos a la hora de resolver el problema del desequilibrio de sedimento en la tomas laterales de los ríos, que se abordará también en los apartados siguientes relativos a investigaciones con paneles sumergidos, destacando algunos de los estudios más significativos.

2.2.3.2. Otras investigaciones en derivaciones

NOTA: En todas estas investigaciones se han utilizado modelos de canales con derivación, así que se sobreentenderá que este aspecto a lo largo del resto de investigaciones.

Investigaciones de Nakato y Kennedy

En 1990, Nakato y Kennedy hicieron en el IIHR las primeras investigaciones en derivaciones mediante un canal de recirculación de 12,2 metros de largo, 0,46 metros de altura y 1,8 metros de ancho. Los estudios se realizaron con el objetivo de comprobar si la técnica de paneles sumergidos funcionaba correctamente en una toma lateral de una estación de bombeo, estudiando principalmente el control del “shoaling” mediante las placas.

Los resultados demostraron que una sola fila de paneles no eliminaba por completo el efecto “shoaling” y sobre todo que la colocación de varios conjuntos de dos filas de paneles proporcionaban los resultados óptimos.

Investigaciones de Nakato y Odgen

En 1998, Nakato y Odgen realizaron una investigación en el IIHR en la que principalmente se tomó por objetivo el control del sedimento en tomas laterales de los ríos con lechos de arena. Los resultados demostraron que los paneles sumergidos instalados en el lecho que se encontraban cerca de toma lateral reducían en gran medida la entrada de sedimentos en la rama lateral.

Investigaciones de Barkdoll, Ettema y Odgaard

En 1999 Barkdoll, Ettema y Odgaard realizaron investigaciones con el fin de gestionar el control del sedimento en las derivaciones y encontrar los límites y algunas posibles mejoras en la técnica de los paneles sumergidos. Las características del modelo eran las siguientes:

Tabla 3: Características de ambas de las ramas del modelo de canal utilizado por Barkdoll, Ettema y Odgaard.

Ramal principal	Ramal lateral
L = 24 m	L = 2,44 m
B = 1,5 m	B = 0,61 m
h = 0,152 m	h = 0,152 m
D = 0,9 mm	D = 0,9 mm

3. Preparación a los ensayos y metodología de trabajo

3.1. Introducción y descripción del lugar de trabajo

Los experimentos se han llevado a cabo en un modelo físico situado en el Laboratorio de Morfodinámica Fluvial del Grupo de Investigación de Transporte de Sedimentos (GITS), ubicado en el recinto del Parque Agrópolis UPC (Viladecans). El modelo consiste en un canal de unos 7 metros de largo y 0,6m de ancho (rama principal) con una rama lateral conectada a 4,5 metros de la entrada. Esta rama tiene una longitud de 1,7 metros y el mismo ancho que la rama principal. La distancia del canal principal, aguas abajo de la derivación, será la misma que la del canal lateral (1,7 metros). Las

este documento se han realizado para caudales comprendidos entre 13,5 y 14,6 l/s, que corresponden a valores en los cuales el comportamiento del flujo y del sedimento toma unas características notablemente diferentes.



Figura 29: Bomba utilizada, situada al principio del canal.

La arena que se ha utilizado tiene un diámetro de 0,25mm ($\sigma=0,08\text{mm}$). El sedimento se suministra mediante una tolva, que será calibrada previamente, con el fin de conocer la relación entre las frecuencias y los caudales sólidos. Tanto el procedimiento de la calibración como los resultados obtenidos se detallan en el apartado 3.3.2. Para los experimentos, se mantendrá un caudal sólido constante de 16,5 g/s, correspondiente a una frecuencia de 3,28 Hz (las frecuencias del dispositivo que controla la tolva van de 0 a 9 Hz). La capacidad de la tolva es de unos 35 litros, que corresponden a unos 70 kg de arena, lo cual deja un tiempo aproximado de experimentación de una hora y media.



Figura 30: Tolva que suministra la arena al canal.

En un principio se pretendía suministrar el sedimento aguas abajo del dissipador de energía, para evitar la colmatación de los conductos, pero debido a las inadmisibles turbulencias que se generaban y a la falta de espacio de la zona en cuestión, se ha decidido colocar el panel unos centímetros aguas abajo de su posición inicial,

provocando que el suministro de arena se produzca aguas arriba del panel. Se espera que la colmatación de algunos de los conductos no altere de forma significativa los resultados del experimento.

Tanto el agua como el sedimento viajan a través del modelo y se miden sus caudales a la salida de cada rama. El caudal líquido se mide mediante el método volumétrico utilizando un depósito de $1,6 \text{ m}^3$ y midiendo los tiempos en que un determinado incremento de volumen se introduce en dicho tanque. Dicho depósito de salida está dentro de un tanque principal que contiene tres compartimentos: dos situados a la salida de cada tubería de salida (ramal principal y lateral), aguas arriba de los vertederos y el comentado, aguas abajo de estos vertederos, que conecta con los dos anteriores. El objetivo es calibrar el modelo a fin de conseguir la relación entre las frecuencias a las que funciona la bomba y los caudales líquidos. El procedimiento y los cálculos realizados de esta calibración se detallan en el apartado 3.3.1.

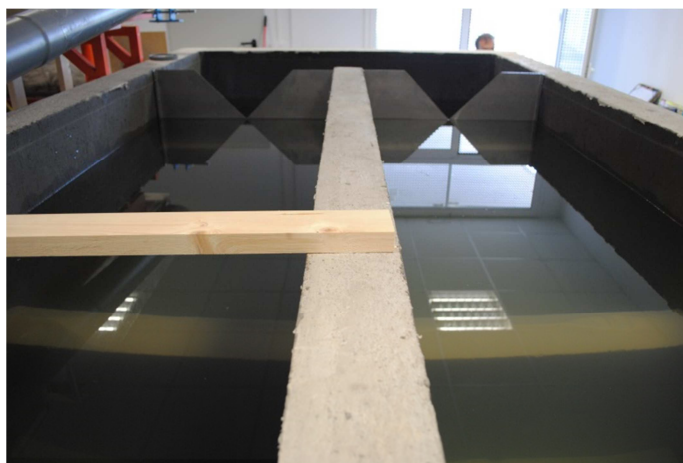


Figura 31: Depósitos de salida con el nivel de agua ajustado para iniciar los ensayos.

Destacar también que los ensayos llevados a cabo se han realizado para un ángulo de desvío de la rama lateral de 90° . Hay otros experimentos anteriores que se han llevado a cabo con ángulos diferentes, pero debido a las limitaciones tanto de espacio como de conocimientos a la hora de realizar la construcción, se ha creído conveniente tomar únicamente este valor para realizar los ensayos.

También hay que remarcar que previo al modelo explicado había otro utilizado para experimentos similares, pero no se ha utilizado debido a que se precisaba un ancho mayor para los ensayos que se necesitaban realizar. Por tanto, se ha llevado a cabo un procedimiento constructivo, que se detalla en el apartado 3.2. para llegar a la solución del modelo final deseado. Además, el conocimiento de los resultados en los experimentos realizados en el canal anterior será de gran ayuda para poder comparar

resultados y contrastar las conclusiones finales. Finalmente, en el apartado 3.4. se describirá de forma cualitativa la metodología de los ensayos, detallando las diferentes actividades que se han realizado a lo largo de la investigación y sus características principales (material y aparatos empleados, objetivos de la actividad y procedimiento de la medición).

3.2. Procedimiento constructivo

Para poder alcanzar los objetivos que se han considerado en el apartado 1.3., y previo a la realización de los ensayos, se ha precisado construir un modelo de canal que permitirá comparar los resultados obtenidos en la teoría abordada en el apartado 2 con los resultados registrados en los ensayos. Como ya se ha mencionado en la introducción, previamente se había instalado un canal con finalidades similares, pero las dimensiones de éste no eran suficientes para abordar los objetivos planteados de forma correcta. Por tanto, para obtener el modelo que se necesita, se ha realizado todo un proceso de construcción hasta alcanzar el resultado final que se ha descrito anteriormente. Hace falta destacar que este proceso constructivo ha sido bastante complejo y se ha destinado la mayor parte del tiempo para su elaboración, debido a las múltiples modificaciones que se han precisado realizar respecto al canal que había originalmente y a los diversos imprevistos y correcciones que han ido sucediendo a lo largo del proceso constructivo. A continuación se detallarán los pasos que se han seguido y las diferentes actividades que se han ejecutado para obtener el modelo final que se precisa para cumplir los objetivos propuestos.

El ancho del canal anterior era de dimensiones más reducidas (0,2 metros) y se ha aumentado a 0,6 metros con el objetivo de poder observar con mayor facilidad los diferentes efectos producidos por el flujo de agua y de sedimento y para aumentar la superficie a la hora de la colocación de los paneles sumergidos. Además, la existencia de este modelo anterior también servirá de gran ayuda para verificar que los resultados tienen la misma escala de valores y para comprobar si son similares o bien la modificación del ancho es un parámetro que modifica el comportamiento del flujo. Por tanto, el primer paso a seguir será retirar el canal construido con anterioridad, dejando únicamente la base en la que éste se apoyaba. Debido a la falta de uso durante varios años, esta base se había deteriorado de forma importante, observándose un avanzado estado de oxidación en algunos de sus puntos. Por tanto, se ha lijado y recubierto con una pintura antioxidante para prevenir este problema en el futuro.



Figura 32: Bases del canal antes de iniciar el trabajo. Se observa el avanzado estado de oxidación de la pieza.

Hace falta destacar que, al aumentar el ancho de dicho canal, la base en la cual se apoya es insuficiente para resistir el peso de éste, así que con el objetivo de que las placas no sufran deformaciones excesivas debidas a la flexión, se han colocado de forma equidistante barras metálicas de mayor ancho, soldadas a la base.



Figura 33: Barras con gomaespuma sobre las que se apoya el canal principal.

Como se puede observar, a las barras también se les ha añadido un recubrimiento de gomaespuma con el objetivo de amortiguar el peso del canal y para que éste se apoye en todos los elementos colocados (se ha comprobado que sin este recubrimiento el canal no se apoyaba en algunas de las barras, lo cual puede producir problemas de deformaciones no deseados en el futuro). Destacar que esta solución se ha llevado a cabo únicamente en la rama principal. En la rama lateral no era posible ejecutarla, ya que la altura de la base sería excesiva y no se podría mantener el mismo nivel en todo el modelo. También hay que destacar que se ha modificado la posición de salida de la rama lateral respecto a los ensayos previos ejecutados. No obstante, ésta sigue funcionando con un ángulo de 90° respecto a la rama principal, lo cual provoca que la

base esté desplazada respecto al punto medio del canal. Por tanto, para mantener sólida la estructura, se han colocado pilares de madera cortados a la altura deseada, un apoyo anclado a la pared del depósito de salida por la parte final del tramo y dos vigas metálicas que sujetan todo el canal longitudinalmente.



Figura 34: Apoyos del ramal lateral.

Previo a la colocación de los elementos que componen el canal, se ha ajustado el nivel de la base, de forma que ésta sea totalmente plana a lo largo de todo el modelo. El método consiste en observar, mediante un piezómetro con agua tintada en su interior, el nivel de agua en la parte superior de dos apoyos del canal y, manteniendo fijo uno de ellos, ajustar la altura del otro hasta que el nivel en ambos apoyos sea el mismo. Este procedimiento se repetirá para cada uno de las bases del modelo, consiguiendo así que éste sea totalmente plano.

Una vez la base está lista, se colocan los elementos que componen el canal. Para su ejecución, se ha creído conveniente utilizar piezas de metacrilato de 1 cm de espesor. Estas piezas se han unido entre sí con cloroformo. Este producto hace que las piezas se derritan por la zona de unión, consiguiendo un sellado casi perfecto. Una vez pegados y colocados los elementos del canal, se ha observado que las paredes de éste sufrían excesivos esfuerzos que hacían que las piezas se desplazaran hacia fuera respecto a la perpendicular. Para evitar este problema, se han cortado y colocado listones de metacrilato por la parte superior uniendo las paredes, a fin de evitar estos desplazamientos.



Figura 35: Piezas superiores de metacrilato colocadas para resistir los esfuerzos a los que se ven sometidas las piezas laterales.

Una vez los elementos que componen la estructura del canal están listos, se colocan otra serie de elementos fundamentales y necesarios para que el modelo funcione de forma correcta. A continuación se detallan cuáles son estos elementos, su función y como se han ejecutado:

- Disipador de energía (“panel de abejas”): Este elemento se coloca al principio del modelo con el objetivo de minimizar las turbulencias que se generan en la entrada del canal, producidas por el vertido brusco de agua generado por la bomba. Su presencia produce una laminación del agua que hace que el nivel se mantenga suficientemente constante a lo largo de todo el canal. El panel está compuesto por un conjunto de tubos de PVC de 2,5 cm de diámetro y unos 8 cm de longitud colocados uno encima de otro y pegados entre ellos con un pegamento especial para PVC.



Figura 36: Panel de abejas en funcionamiento.

- Pieza de metacrilato en forma de “L”: Esta pieza se coloca antes de los puntos de desagüe de las dos ramas y tiene la función de conservar el sedimento que se ha añadido previo a los ensayos a lo largo del canal. Además, también sirve para evitar la erosión local en el tramo final de cada rama. Para ello, se han pegado dos piezas de metacrilato, teniendo en cuenta que el elemento final debe tener una altura de 20 cm y una longitud de 21 cm.



Figura 37: Pieza metacrilato en forma de L.

El siguiente paso a seguir será conectar el canal con los depósitos de entrada y salida, a fin de conseguir un modelo con el cual se pueda recircular el agua. Por lo que respecta a la entrada de agua, los cambios efectuados han sido relativamente pocos. El único hecho a destacar es que, al haberse modificado el punto inicial en el cual se ha colocado el canal se ha tenido que alargar la tubería de entrada mediante una unión. Este hecho ha provocado que la tolva por la cual entra el sedimento en el canal esté situada entre la entrada de agua y el panel de abejas. No obstante, se espera que el modelo funcione de forma correcta, a pesar de que una gran mayoría de los tubos que forman el panel acaben enterrados por el lecho del canal.

En lo referente a la salida de agua, las modificaciones han sido más destacables, ya que se ha tenido que hacer todo un sistema nuevo de evacuación (del antiguo no se podía conservar nada, ya que las dimensiones entre un modelo y otro son excesivamente diferentes para mantener un mismo sistema de desagüe). Por tanto, los pasos a seguir han sido los siguientes:

- Se realizan unos huecos cuadrados de 13 cm en la parte inferior de la pared lateral, al final de cada rama.

- Se colocan unas coronas de metacrilato de 12,5 cm de diámetro interior y 16,5 cm de diámetro exterior, que circunscriben por la parte interior a la abertura cuadrada realizada previamente. Estas piezas irán pegadas a las paredes por medio de cloroformo.
- Se colocan codos de tubería de PVC de 12,5 cm de diámetro exterior dentro de las coronas de metacrilato y se unen mediante un pegamento que sirve para unir elementos de estos dos materiales. Además, para que el sellado sea mejor, se ha recubierto la zona con una pintura impermeabilizante que evitará el paso de agua por las juntas.
- Finalmente, se colocan las tuberías de desagüe mediante tubos y codos de PVC del mismo diámetro, yendo a parar a los dos depósitos de salida que se sitúan aguas arriba de los vertederos.



Figura 38: Sistema de desagüe del canal. Se observa el resultado final de las tuberías de cada rama y el tanque de salida con los vertederos.

Una vez ejecutados los sistemas de entrada y salida de agua, se ha vuelto a aplicar cloroformo (o un compuesto de cloroformo y metacrilato, con más espesor, para aquellos huecos más complicados de tapar) en los puntos donde se puede filtrar el agua. Por el mismo motivo, se ha aplicado pegamento para PVC en cada una de las juntas de los tubos de entrada y salida de agua. Este procedimiento se ha repetido también después de realizar pruebas sobre el canal, ya que a pesar de haber cubierto los puntos conflictivos, en algunos de ellos no se había hecho el sellado de forma perfecta (sobre todo hay que destacar los problemas que ha causado el sistema de salida de la rama principal). Destacar también que se ha efectuado una limpieza del tanque de entrada, ya que debido a su falta de uso durante un largo periodo de

tiempo, el agua tenía un elevado contenido de impurezas y suciedad que se debía eliminar. Además, para asegurar que el agua se mantenga desinfectada, se ha depositado una pastilla de cloro en el depósito.

Una vez se ha introducido agua en el canal, también se ha podido observar problemas de funcionamiento en la bomba. Debido a su falta de uso, ésta había acumulado una gran cantidad de óxido que se ha depositado en el modelo, lo cual podía distorsionar los resultados de los ensayos. Por tanto, este óxido se ha extraído del modelo haciendo succión por medio de un tubo de goma que, de forma lenta y laboriosa, ha ido aspirando las partículas no deseadas.

En los compartimentos del depósito de salida se ha colocado un total de tres piezómetros: uno en el depósito de salida de la rama principal, otro en el de salida de la rama lateral y otro en el compartimento aguas debajo de los vertederos. Estos piezómetros servirán para realizar la calibración de caudal líquido y para conocer de forma rápida el agua que circula en función de las variaciones de nivel en los compartimentos de salida. Dicha calibración de caudales líquidos se explica de forma detallada en el apartado 3.3.



Figura 39: Piezómetro instalado en el depósito de salida.

Debido a que la tubería de salida del ramal principal está colocada aguas abajo de la pieza final en “L”, ha sido necesaria la colocación de una pequeña tubería adicional que servirá para evacuar el agua que contiene el lecho del modelo si la ocasión lo requiere mediante una llave de paso. Además, para evitar el paso de sedimento hacia los depósitos de salida, se ha colocado una malla filtradora en la entrada de la tubería y un filtro de gravas de diferentes granulometrías.



Figura 40: Pequeña tubería de desagüe, ubicada bajo el filtro de gravas.



Figura 41: Filtro de gravas colocado al final del canal principal.

Por último, se ha colocado un filtro de gravas en las tuberías que permiten desaguar los depósitos de salida (aguas arriba del vertedero), a fin de evitar que se obturen cuando se evacue el agua hacia el exterior. Dicho filtro tiene inicialmente una malla filtradora de arenas (igual que la del caso anterior), seguido capas de gravas de diferentes granulometrías (las gravas más finas se colocan en la parte externa del filtro).



Figura 42: Filtro de gravas colocado entre el depósito de salida y las tuberías de desagüe.

Una vez se han construido y colocado todos los componentes del modelo, se han realizado diversas pruebas con el canal en funcionamiento para observar y corregir los problemas que se generan (juntas mal selladas, filtros obturados,...). Una vez se han subsanado estos errores, el modelo ya funciona correctamente y está listo para realizar los ensayos, después de realizar las calibraciones tanto del caudal líquido como sólido que se introduce y distribuye en el sistema.

3.3. Calibración de caudales

Como ya se ha mencionado en la introducción de este apartado, la calibración de caudales es fundamental para poder conocer en cada instante el caudal circulante tanto de agua como de arena a lo largo de los ensayos. Dichos caudales se mantienen constantes durante el transcurso de la mayoría de ensayos, pero el conocimiento de las ecuaciones que relacionan las frecuencias de los dispositivos que controlan tanto la bomba como la tolva con los caudales aportados pueden ser de gran utilidad para investigaciones en las cuales se tantean estas dos variables, como por ejemplo a la hora de estudiar el funcionamiento de los paneles sumergidos en diferentes condiciones. En este apartado se detallan tanto el procedimiento de estas calibraciones como los resultados obtenidos en los experimentos y las posteriores gráficas y ecuaciones obtenidas en el post proceso de los datos.

3.3.1. Calibración de caudal líquido

Procedimiento de la calibración

Previamente a la realización de los ensayos, se ha creído conveniente realizar una calibración de caudales líquidos para poder determinar de forma más rápida y directa cuál es el caudal que circula por el modelo. La idea de esta calibración es conocer el valor de los caudales líquidos mediante la medición de las variaciones del nivel del agua en el tanque de salida. De esta manera, sólo haciendo esta medición se podrá determinar de forma directa el caudal que circula por cada ramal. El procedimiento que se ha seguido para alcanzar los resultados finales se detalla a continuación.

Como ya se ha dicho anteriormente, esta calibración se llevará a cabo mediante la medida de las diferencias de los niveles de agua en los tanques de salida. Para ello, se han colocado piezómetros en los tres compartimentos para medir los niveles de forma precisa.

Para conocer los valores de caudal circulante se ha empleado el método volumétrico, que consiste en determinar el volumen de agua que se acumula en el tanque de salida en un cierto periodo de tiempo, para la frecuencia dada. Los resultados obtenidos se emplearán para obtener las ecuaciones de caudal para cada uno de los dos vertederos. El procedimiento que se ha realizado es el siguiente:

- Previo a la realización de la calibración, se han colocado los piezómetros en cada uno de los tanques en los que se divide el tanque de salida para conocer los niveles que hay para cada frecuencia de la bomba. Estos piezómetros van acompañados de una cinta métrica para facilitar y agilizar el trabajo.
- Una vez que se han colocado los piezómetros debemos obtener el nivel de referencia en los tanques que se sitúan aguas arriba del vertedero. Este nivel será el correspondiente al punto más bajo del aliviadero (vértice inferior del triángulo). Para ello, se llenan los tanques de agua y después se desguaza hacia el tanque situado aguas abajo de los vertederos hasta el punto en que el caudal sea nulo, momento en el que obtenemos el nivel de referencia.

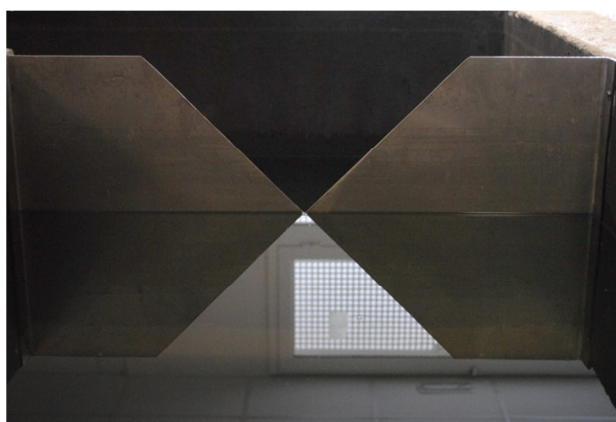


Figura 43: Nivel de referencia de los tanques de salida.

Conocido el nivel de referencia aguas arriba del vertedero, se acciona la bomba con una frecuencia de salida baja (en nuestro caso, hemos tomado una frecuencia inicial de 24Hz) y se deja transcurrir un cierto tiempo hasta que los niveles de ambos tanques se estabilicen. Hay que destacar que, al tener dos aliviaderos, primero calibraremos uno y después el otro. Por tanto, cuando calibremos el caudal del aliviadero 1, deberemos cerrar la tubería correspondiente a la rama lateral, y viceversa. El cierre de las tuberías se lleva a cabo mediante unas tapas, colocadas al final de las ramas.

- Cuando los niveles se han estabilizado, tomamos la medida de la diferencia de nivel que ha experimentado el depósito situado aguas arriba del vertedero debido al aumento de caudal.
- Seguidamente, se hará el cálculo del caudal circulante de forma experimental mediante el método volumétrico, que consiste en calcular la diferencia de volumen que se produce en un cierto intervalo de tiempo (en nuestro caso, hemos tomado intervalos de tiempo iniciales de 15 segundos). Para ello, se cierra la válvula de salida del vertedero de aguas abajo (la situada antes del tanque de entrada al canal) durante el intervalo escogido y se vuelve a abrir una vez transcurrido ese tiempo. En principio, para cada frecuencia, se efectuarán tres medidas y se tomará la media, para minimizar los errores que se puedan producir. No obstante, si el coeficiente de variación es mayor al 6% para las medidas de la misma frecuencia, será necesario aumentar el número de tomas para obtener resultados válidos. Este procedimiento se repetirá para cada frecuencia, que irá aumentando en un valor de 2Hz hasta alcanzar la frecuencia máxima seleccionada (en este caso, se ha utilizado un valor de frecuencia máxima de 36Hz). Además, también será necesario hacer el cálculo del área del tanque situado aguas abajo de los vertederos para poder realizar este cálculo.
- Obtenidos los valores de caudales de forma experimental, se compararán con los resultados obtenidos de forma teórica y, mediante mínimos cuadrados, se minimiza el error entre ambos, obteniendo los valores de las constantes que aparecen en la ecuación del cálculo teórico del caudal.

Una vez calibrada la ecuación, el cálculo del caudal líquido se realiza de forma sencilla, ya que únicamente se necesite medir el incremento del nivel del tanque aguas arriba del vertedero para conocer su valor, lo cual es de gran ayuda para la ejecución de los ensayos. El procedimiento numérico y el análisis de los datos se detallan en el apartado 4.5.1. con los resultados obtenidos y las diferentes gráficas y ecuaciones relativas a los caudales de cada ramal por separado y al caudal circulante total.

Análisis de los datos obtenidos

Para conseguir las ecuaciones de caudales líquidos que mejor se adaptan al modelo en ambos vertederos, se han efectuado medidas de los incrementos de nivel para el rango de frecuencias seleccionadas, tanto en el tanque aguas abajo de los verederos como en los situados aguas arriba.

Seguidamente, comprobamos que los datos son fiables calculando el coeficiente de variación para cada frecuencia. Para conocer este valor, necesitamos obtener las desviaciones de las variaciones de nivel aguas abajo del vertedero y su media. Las fórmulas utilizadas son las siguientes:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad \text{Ec (16)}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad \text{Ec (17)}$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100 \leq 6\% \quad \text{Ec (18)}$$

Destacar que para el depósito correspondiente al canal principal (izquierda) los resultados obtenidos referentes a los coeficientes de variación están dentro del rango admisible y, por tanto, no ha sido necesario realizar más medidas. En cambio, para el depósito de la rama lateral (derecha) los coeficientes de variación para las frecuencias de 30, 32 y 34Hz superan el 6% y, por tanto, ha sido necesario efectuar más tomas. Así que para estas frecuencias, se han tomado otras tres medidas y se ha creído conveniente aumentar el intervalo de tiempo de medición, siendo éste de 30 segundos, con el fin de obtener resultados más precisos. Las imprecisiones para estas frecuencias se deben a que, para altos caudales, los niveles en el tanque no son muy estables, debido a las turbulencias que se generan. Este hecho sumado a que la posición del piezómetro es demasiado cercana a la salida del agua por el vertedero genera importantes desviaciones entre las diferentes mediciones, que producen el excesivo error mencionado.

Una vez realizadas estas modificaciones, los resultados obtenidos para para los dos ramales han sido los siguientes:

Ramal principal (izquierdo)

Tabla 4: Mediciones de niveles realizadas en el depósito izquierdo, con sus medias y coeficientes de variación.

frecuencia(Hz)	lectura	Δh (cm) arriba	Δh (cm) abajo	Δh (cm) arriba medio	Δh (cm) abajo medio	CV
24	1	10,8	6,5	10,5	6,8	1,471
	2	10,8	6,6			
	3	10,8	6,5			
26	1	12,1	8,6	11,9	8,6	1,163
	2	12,1	8,5			
	3	12,1	8,9			
28	1	13,1	10,6	12,8	10,3	0,562
	2	13,1	10,4			
	3	13,1	10,8			
30	1	13,8	13	13,5	12,1	0,719
	2	13,8	11,9			
	3	13,8	12			
32	1	14,2	13	14,2	13,6	1,845
	2	14,2	13,9			
	3	14,2	13,6			
34	1	14,9	13,7	14,8	14,7	1,178
	2	14,9	14,4			
	3	14,9	14,2			
36	1	15,7	15,4	15,4	15,8	1,899
	2	15,7	15,2			
	3	15,7	15			

Ramal lateral (derecho)

Tabla 5: Mediciones de niveles realizadas en el depósito derecho, con sus medias y coeficientes de variación

frecuencia(Hz)	lectura	Δh (cm) tanque arriba	Δh (cm) tanque abajo	Δh (cm) arriba medio	Δh (cm) abajo medio	CV
24	1	10,8	6,5	10,8	6,5	0,884
	2	10,8	6,6			
	3	10,8	6,5			
26	1	12,1	8,6	12,1	8,7	2,402
	2	12,1	8,5			
	3	12,1	8,9			
28	1	13,1	10,6	13,1	10,6	1,887
	2	13,1	10,4			
	3	13,1	10,8			
30	1	13,8	24,3	13,8	23,7	2,749
	2	13,8	23			
	3	13,8	23,7			
32	1	14,2	27,7	14,2	27,5	2,828
	2	14,2	28,1			
	3	14,2	26,6			
34	1	14,9	29,5	14,9	29	2,414
	2	14,9	28,2			
	3	14,9	29,3			
36	1	15,7	15,4	15,7	15,2	1,316
	2	15,7	15,2			
	3	15,7	15			

Como se puede observar, la limitación del coeficiente de variación se cumple para todo el rango de frecuencias. Por tanto, la serie de datos obtenida se considera suficientemente fiable para continuar la calibración de caudales.

A continuación se estima el caudal circulante de forma experimental mediante el método volumétrico, que consiste en calcular el incremento de volumen que se

produce en el tanque aguas abajo de los vertederos (una vez cerrada la válvula) durante el intervalo de tiempo considerado. La variación de nivel que se ha seleccionado es la correspondiente a la media de las medidas realizadas para cada frecuencia. Además, también se han calculado las dimensiones del tanque para obtener su área. Una vez conocidos estos valores, la fórmula que se utiliza es la siguiente:

$$Q_{medido} [L/s] = \frac{A_{tanque} [m^2] * \Delta h_{tanque\ abajo} [m]}{\Delta t [s]} * 1000 \quad Ec (19)$$

Los resultados obtenidos de los caudales calculados de forma experimental se detallan en las siguientes tablas:

Ramal principal (izquierdo)

Tabla 6: Valores de caudales medidos obtenidos en el ramal principal.

Frecuencia	Δh (cm) arriba medio	Δh (cm) abajo medio	Q medido (L/s)
24	10,5	6,8	5,4
26	11,9	8,6	6,8
28	12,8	10,3	8,2
30	13,5	12,05	9,6
32	14,2	13,6	10,8
34	14,8	14,7	11,7
36	15,4	15,8	12,6

Ramal lateral (derecho)

Tabla 7: Valores de caudales medidos obtenidos en el ramal lateral.

Frecuencia	Δh (cm) arriba medio	Δh (cm) abajo medio	Q medido (L/s)
24	10,8	6,5	5,2
26	12,1	8,7	6,9
28	13,1	10,6	8,4
30	13,8	23,7	9,4
32	14,2	27,5	10,9
34	14,9	29	11,5
36	15,7	15,2	12,1

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo es obtener la ecuación relativa a cada vertedero que, conocida la variación de nivel que se produce en el tanque (aguas arriba de los vertederos) nos proporcione el caudal relativo a esa variación de nivel. La fórmula que se ha utilizado es la siguiente:

$$Q_{\text{cálculo}} = C_d * (\Delta h + A)^{5/2}$$

Ec (20)

Donde:

C_d : Coeficiente indicador de las condiciones de escurrimiento del agua sobre el vertedero.

Δh : Variación de nivel aguas arriba de los vertederos.

A: Parámetro corrector (sirve para corregir los posibles errores producidos durante las mediciones).

NOTA: Para el siguiente procedimiento, se precisan valores iniciales tanto para el coeficiente C_d como para el parámetro A. Los valores orientativos que se han asumido son, respectivamente, 1,336 y 0,0008.

Para conocer el valor real de estos parámetros en nuestro modelo, se minimizan las diferencias entre el caudal medido y el calculado. Para ello, se calculará el error cuadrático entre una y otra para cada una de las medias de nivel que se han calculado previamente. Con el programa de cálculo SOLVER se obtienen los resultados que mejor ajustan y minimizan este error. A continuación se muestran las tablas obtenidas de caudal calculado utilizando la fórmula mencionada, así como las gráficas comparativas entre el caudal medido y el calculado:

Ramal principal

Tabla 8: Caudales obtenidos en el ramal principal mediante la fórmula obtenida

Δh tanque (cm)	Q (L/s)	Δh tanque (cm)	Q (L/s)
10,5	5,31	13,1	8,79
10,6	5,43	13,2	8,94
10,7	5,54	13,3	9,10
10,8	5,66	13,4	9,26
10,9	5,78	13,5	9,41
11	5,90	13,6	9,58
11,1	6,02	13,7	9,74
11,2	6,15	13,8	9,90
11,3	6,27	13,9	10,07
11,4	6,40	14	10,24
11,5	6,53	14,1	10,41
11,6	6,65	14,2	10,58
11,7	6,79	14,3	10,75
11,8	6,92	14,4	10,93
11,9	7,05	14,5	11,10
12	7,19	14,6	11,28
12,1	7,33	14,7	11,46
12,2	7,46	14,8	11,64
12,3	7,61	14,9	11,83
12,4	7,75	15	12,01
12,5	7,89	15,1	12,20
12,6	8,04	15,2	12,39
12,7	8,18	15,3	12,58
12,8	8,33	15,4	12,77
12,9	8,48	15,5	12,96

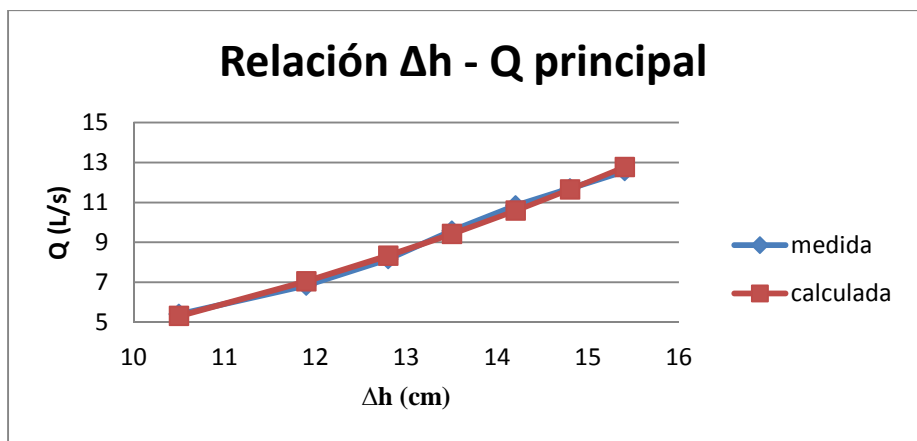


Figura 44: Líneas de tendencia obtenidas con los valores de caudales medidos y calculados en el ramal principal.

$$Q_{\text{cálculo}} \left(\frac{L}{s} \right) = \left(1.144 * (\Delta h * 0.01 + 0.0116)^{\frac{5}{2}} \right) * 1000$$

Ec (21)

Ramal lateral

Tabla 9: Caudales obtenidos en el ramal lateral mediante la fórmula obtenida.

Δh tanque (cm)	Q (L/s)	Δh tanque (cm)	Q (L/s)
10,8	5,47	13,4	8,86
10,9	5,58	13,5	9,01
11	5,69	13,6	9,16
11,1	5,81	13,7	9,32
11,2	5,93	13,8	9,47
11,3	6,04	13,9	9,63
11,4	6,16	14	9,79
11,5	6,28	14,1	9,95
11,6	6,41	14,2	10,11
11,7	6,53	14,3	10,27
11,8	6,66	14,4	10,44
11,9	6,78	14,5	10,60
12	6,91	14,6	10,77
12,1	7,04	14,7	10,94
12,2	7,17	14,8	11,11
12,3	7,31	14,9	11,28
12,4	7,44	15	11,46
12,5	7,58	15,1	11,63
12,6	7,71	15,2	11,81
12,7	7,85	15,3	11,99
12,8	7,99	15,4	12,17
12,9	8,13	15,5	12,35
13	8,28	15,6	12,53
13,1	8,42	15,7	12,72
13,2	8,57	15,8	12,91
13,3	8,71	15,9	13,09

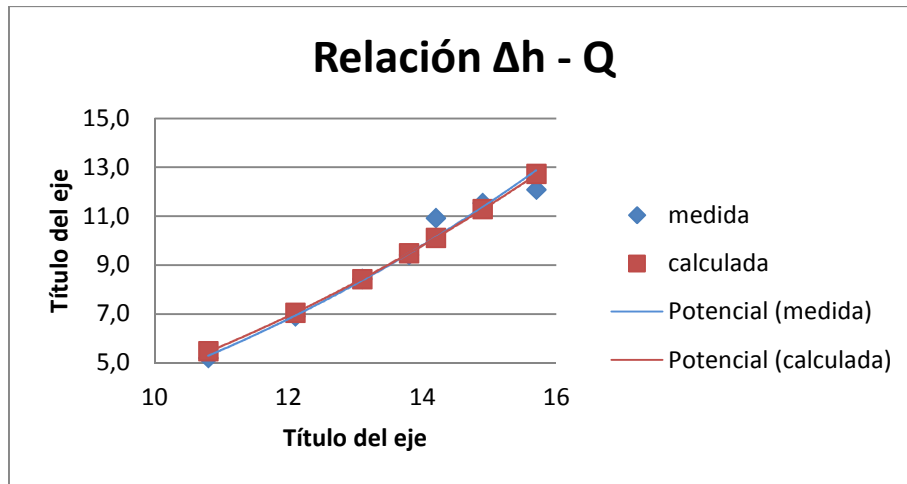


Figura 45: Líneas de tendencia obtenidas con los valores de caudales medidos y calculados en el ramal lateral.

$$Q_{\text{cálculo}} \left(\frac{L}{s} \right) = \left(1.053 * (\Delta h * 0.01 + 0.0139)^{\frac{5}{2}} \right) * 1000 \quad \text{Ec (22)}$$

Como se puede observar, los valores obtenidos referentes a los parámetros que se deseaban calcular son:

- Vertedero izquierdo: $C_d = 1,144$ $A = 0,0116$
- Vertedero derecho: $C_d = 1,053$ $A = 0,0139$

Analizando estas gráficas, se observa que los resultados obtenidos para el vertedero izquierdo se ajustan casi de forma perfecta, mientras que en los relativos al vertedero derecho se produce un cierto error. Como se ha comentado anteriormente, esto es debido a la dificultad de hacer una medición exacta de los niveles de agua aguas abajo del vertedero, ya que se generan importantes turbulencias cercanas al punto de medición donde se ha colocado el piezómetro, cosa que produce errores de difícil corrección.

Por tanto, el objetivo de la calibración se ha cumplido de forma más o menos precisa y se han obtenido las ecuaciones relativas a los caudales de cada vertedero. Estas ecuaciones son las siguientes:

$$Q_{\text{izquierdo}} = \left(1,144 * (\Delta h * 0.01 + 0,0116)^{\frac{5}{2}} \right) * 1000$$

$$Q_{\text{derecho}} = \left(1,053 * (\Delta h * 0.01 + 0,0139)^{\frac{5}{2}} \right) * 1000$$

Estas dos ecuaciones pueden ser de gran ayuda para obtener el caudal circulante por cada rama en los ensayos, ya que solamente con la medición de la variación del nivel aguas arriba del vertedero (respecto al nivel de referencia que se había marcado al principio de la calibración) se podrá calcular su valor. Además, también se ha obtenido los resultados relativos al caudal total, cuyo resultado es igual a la suma de los dos anteriores. Como la gran mayoría de los ensayos se realizarán con los dos canales con circulación de caudal, esta calibración será la que servirá de mayor ayuda. Hace falta destacar que, a diferencia de los dos casos anteriores, el caudal obtenido en este caso irá en función de la frecuencia del aparato que controla la bomba, con el propósito de agilizar aún más la elaboración de los ensayos, sin tener que ir observando el nivel de los piezómetros para conocer el valor del caudal. La tabla relativa de valores correspondientes, junto con la respectiva gráfica y la ecuación de caudales, se detallan a continuación (se ha tomado un rango de caudales que va de 10,6 a 24,9 L/s, correspondientes a un rango de frecuencias de 24 a 36,2 Hz. Los valores de caudales se obtienen de la suma de las dos ecuaciones anteriores, por lo que se ha obtenido estos valores numéricamente y no haciendo toma de datos):

Tabla 10: Caudales totales obtenidos para los diferentes valores de frecuencias.

Frecuencia	Q total (L/s)	Frecuencia	Q total (L/s)
24	10,6	30,2	19,5
24,2	10,9	30,4	19,7
24,4	11,2	30,6	20,0
24,6	11,6	30,8	20,2
24,8	11,9	31	20,4
25	12,2	31,2	20,6
25,2	12,5	31,4	20,8
25,4	12,9	31,6	21,0
25,6	13,2	31,8	21,3
25,8	13,5	32	21,5
26	13,8	32,2	21,7
26,2	14,1	32,4	21,9
26,4	14,4	32,6	22,0
26,6	14,7	32,8	22,2
26,8	15,0	33	22,4
27	15,3	33,2	22,6
27,2	15,6	33,4	22,8
27,4	15,9	33,6	23,0
27,6	16,2	33,8	23,1
27,8	16,4	34	23,3
28	16,7	34,2	23,5
28,2	17,0	34,4	23,6
28,4	17,2	34,6	23,8
28,6	17,5	34,8	23,9
28,8	17,8	35	24,1
29	18,0	35,2	24,2
29,2	18,3	35,4	24,4
29,4	18,5	35,6	24,5
29,6	18,8	35,8	24,7
29,8	19,0	36	24,8
30	19,3	36,2	24,9

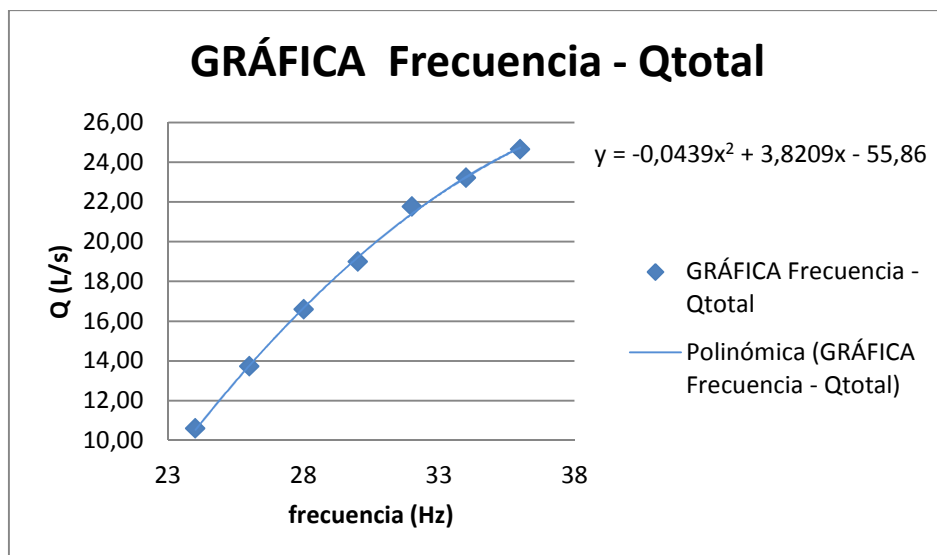


Figura 46: Línea de tendencia obtenida mediante la relación de caudales totales y frecuencias.

$$Q = -0.0439 * f^2 + 3.8209 * f - 55.86$$

Ec (23)

3.3.2. Calibración de caudales sólidos

Procedimiento de la calibración

El último paso antes de la iniciación de los ensayos consiste en realizar una calibración del sedimento, a fin de poder determinar de forma correcta y rápida el caudal sólido que entra en el modelo en función de la frecuencia del aparato que controla la tolva. Dicha calibración, mucho más sencilla que la anterior desde el punto de vista de la ejecución, consistirá en calcular el peso (mediante una báscula de laboratorio, con precisión hasta el miligramo) del sedimento que sale de la tolva durante un cierto intervalo de tiempo, variable dependiendo de la frecuencia estudiada. El valor de caudal sólido que se ha creído conveniente utilizar para la realización de los ensayos es de 16,5 g/s, así que para las frecuencias que proporcionan un aporte sólido próximo a este valor, y con el fin de aproximarse al máximo, se han efectuado dos tomas de 90 segundos cada una, mientras que para el resto de frecuencias con dos tomas de 60 segundos el resultado ya es válido. No ha sido necesario aumentar el número de tomas para cada frecuencia, ya que la báscula mide el peso del sólido con una correcta precisión y el procedimiento de la ejecución se ha realizado un número suficiente de veces como para no cometer errores destacables.

En el apartado 3.6.2. se detalla el sencillo procedimiento de cálculo, los resultados obtenidos en esta serie de medidas, la gráfica que se ha obtenido con la media de

dichas tomas y la ecuación que proporciona el caudal sólido en función de la frecuencia.

Análisis de los datos obtenidos

Para la obtención de la ecuación necesaria para el cálculo del caudal sólido en función de la frecuencia del aparato que controla la tolva, se ha efectuado el método descrito en el apartado 3.4. pesando el sólido que vierte la tolva durante un cierto intervalo de tiempo. La fórmula empleada es la siguiente:

$$q_s = \frac{\text{peso seco muestra}}{\Delta t} \quad \text{Ec (24)}$$

Como en el caso anterior, debemos comprobar que los datos son lo suficientemente fiables calculando el coeficiente de variación, que no debe superar el 6%. Para ello, calculamos las medias y las desviaciones de los caudales sólidos obtenidos, utilizando las mismas fórmulas anteriormente planteadas:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100 \leq 6\%$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 11: Datos obtenidos en la calibración de caudal sólido.

Frecuencia (Hz)	Toma	Δt (s)	Peso seco (g)	qs (g/s)	qs medio (g/s)	CV
1	1	30	291,5	9,72	9,37	3,598
	2	30	280,5	9,35		
	3	30	271,3	9,04		
2	1	60	741,3	12,36	12,35	0,048
	2	60	740,8	12,35		
2,5	1	60	849,9	14,17	14,12	0,426
	2	60	844,8	14,08		
3	1	60	926,5	15,44	15,56	1,038
	2	60	940,2	15,67		
3,26	1	90	1449,6	16,11	16,33	1,972
	2	90	1490,6	16,56		
3,28	1	90	1484,8	16,50	16,47	0,243

	2	90	1479,7	16,44		
3,5	1	60	1035,2	17,25	17,35	0,815
	2	60	1047,2	17,45		
4	1	60	1152,5	19,21	19,27	0,434
	2	60	1159,6	19,33		
5	1	60	1392,7	23,21	23,11	0,612
	2	60	1380,7	23,01		

Estos datos demuestran que las tomas llevadas a cabo son suficientes para validar la calibración, ya que el coeficiente de variación en todas ellas es inferior al 6%. Hace falta destacar que para la primera frecuencia, los resultados obtenidos (para un intervalo de tiempo de 30 segundos) eran demasiado dispersos, por lo que se ha creído conveniente realizar una toma más. Además, debido a este hecho, a partir de este momento se creyó conveniente aumentar el intervalo de tiempo a 60 segundos e incluso a 90 segundos en aquellas frecuencias que se aproximaban al caudal sólido constante que se empleará en los ensayos. Una vez comprobados los datos obtenidos, se ha realizado un gráfico de dispersión y su respectiva línea de tendencia, a fin de conocer la ecuación que mejor ajusta el caudal sólido en función de la frecuencia. La tabla de resultados, junto con la gráfica que relaciona las dos variables y la ecuación obtenida se muestran a continuación:

Tabla 12: Valores de caudal correspondientes a cada frecuencia.

Frecuencia (Hz)	Qs (g/s)	Frecuencia (Hz)	Qs (g/s)	Frecuencia (Hz)	Qs (g/s)	Frecuencia (Hz)	Qs (g/s)
1	9,4	3	15,6	5	23,1	7	32,0
1,1	9,7	3,1	15,9	5,1	23,5	7,1	32,4
1,2	10,0	3,2	16,3	5,2	23,9	7,2	32,9
1,3	10,3	3,3	16,6	5,3	24,3	7,3	33,4
1,4	10,5	3,4	17,0	5,4	24,8	7,4	33,9
1,5	10,8	3,5	17,3	5,5	25,2	7,5	34,4
1,6	11,1	3,6	17,7	5,6	25,6	7,6	34,9
1,7	11,4	3,7	18,1	5,7	26,1	7,7	35,4
1,8	11,7	3,8	18,4	5,8	26,5	7,8	35,9
1,9	12,0	3,9	18,8	5,9	26,9	7,9	36,4
2	12,3	4	19,2	6	27,4	8	36,9
2,1	12,6	4,1	19,6	6,1	27,8	8,1	37,4
2,2	13,0	4,2	19,9	6,2	28,3	8,2	37,9
2,3	13,3	4,3	20,3	6,3	28,7	8,3	38,4
2,4	13,6	4,4	20,7	6,4	29,2	8,4	39,0
2,5	13,9	4,5	21,1	6,5	29,6	8,5	39,5
2,6	14,2	4,6	21,5	6,6	30,1	8,6	40,0
2,7	14,6	4,7	21,9	6,7	30,5	8,7	40,5
2,8	14,9	4,8	22,3	6,8	31,0	8,8	41,1
2,9	15,2	4,9	22,7	6,9	31,5	8,9	41,6

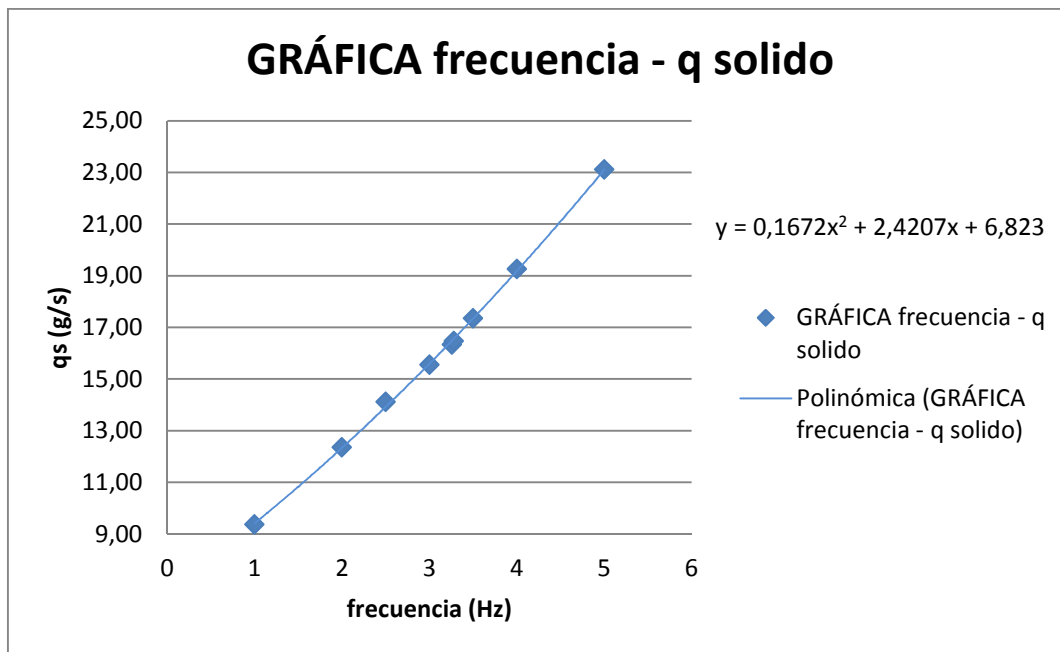


Figura 47: Línea de tendencia obtenida para diferentes frecuencias de los valores de caudal sólido medidos.

$$Q = 0,1672 * f^2 + 2,4207 * f + 6,823$$

Ec (25)

Con esta información, se puede obtener cualquier caudal sólido que esté dentro del rango de frecuencias del dispositivo que controla la tolva sin necesidad de volver a realizar las mediciones, aunque como ya se ha comentado a lo largo del documento, los ensayos se realizarán bajo la condición de caudal sólido constante, por lo que no será necesario emplear esta ecuación para calcular nuevos caudales, pero puede ser de gran ayuda para posteriores estudios que se realicen en el modelo construido. En nuestro caso, la frecuencia que más se aproxima al valor de 16,5 g/s es la correspondiente a 3,28 Hz, así que se mantendrá dicha frecuencia a lo largo de todos los ensayos.

3.4. Procedimiento de los ensayos

Previo a la realización de los ensayos, ha sido necesario calcular el volumen de arena que se requerirá. En total, se necesitan unas 2 toneladas de arena para formar un lecho de unos 21 cm de espesor y realizar un ensayo de 6 horas. No obstante se ha obtenido una mayor cantidad por si la duración estimada de los ensayos aumentaba o por si el rendimiento del secado de la arena era demasiado bajo, pudiendo provocar la

detención de los ensayos. Sobre este secado, hace falta decir que es fundamental para poder realizar los ensayos de forma correcta, ya que si no se introduce el sedimento en la tolva totalmente seco, los granos se adhieren entre sí y pueden obturar parcial o completamente la salida, provocando un vertido no uniforme de éste. Para ello, se ha realizado un secado al sol en bandejas de plástico.



Figura 48: Bandeja de arena secándose al sol.

Hace falta destacar que este proceso es bastante lento, por lo que se han considerado otras formas de realizar el secado, como por ejemplo utilizar un soplador. No obstante, el rendimiento de este segundo proceso es claramente inferior, así que se ha decidido realizar la primera alternativa.

El orden de los ensayos también es uno de los aspectos a destacar, ya que primero se ha realizado el primer ensayo, seguidamente el ensayo 3, luego el ensayo 2 y para finalizar el ensayo 4. Se ha seguido este procedimiento para que el caudal final del ensayo posterior fuera muy similar al del anterior, con el fin empezar en unas condiciones iniciales en las cuales el lecho ha alcanzado o está próximo a las condiciones de equilibrio. A continuación se detallan los caudales utilizados en cada ensayo, siguiendo el orden cronológico:

Tabla 13: Caudales utilizados para cada ensayo.

Ensayo	Q inicial (L/s)	Q final (L/s)
1	13,5	13,5
3	13,5	14,6
2	14,5	14,5
4	14,5	14,5

A continuación se pasará a explicar de forma cualitativa la metodología de los diferentes ensayos realizados, indicando los objetivos a alcanzar y sus características principales. Hace falta destacar que, analizando las investigaciones realizadas

anteriormente en el modelo previo, se ha observado que hay un valor límite de caudal líquido de entrada para el cual el comportamiento del flujo y el sedimento en la zona de la derivación adopta unas características u otras. Para esta línea de investigación, se ha determinado que este valor corresponda a un caudal de 14,25 L/s.

NOTA: En este apartado sólo se expone la metodología y objetivos de los ensayos. Los datos obtenidos, los resultados finales alcanzados y el análisis y discusión de estos resultados se detallarán en el apartado 4.

3.4.1. Ensayos 1 y 2: Comportamiento del flujo y el sedimento sin la presencia de paneles sumergidos

Los ensayos de esta línea de investigación irán encaminados a observar y analizar el comportamiento del flujo y del sedimento en la zona de la derivación y aguas abajo de ella para diferentes caudales, con el objetivo de compararlos y detallar sus diferencias. Destacar que estos ensayos han sido realizados sin la colocación de paneles, a diferencia de los que se explicarán en el siguiente apartado. A continuación se muestra la zona de estudio de los dos primeros ensayos. Destacar que el ensayo 4 se centrará en la misma zona y el ensayo 3, en cambio, se hará sobre el tramo recto aguas arriba de la derivación.



Figura 49: Zona de estudio para los ensayos.

El primer ensayo de esta línea de investigación consistirá en observar el comportamiento del flujo y del sedimento para un caudal inferior a valor límite establecido de 14,25 L/s (en este caso se ha utilizado un caudal de 13,5 L/s). El

objetivo es realizar mediciones de caudales líquidos y sólidos a la salida de cada ramal durante su transcurso, a fin de determinar la evolución de la distribución del flujo y el sedimento, manteniendo el caudal sólido y líquido de entrada constantes. Además, también se harán mediciones del nivel del lecho y la lámina de agua aguas abajo de la desviación por ambas ramas, tomando especial atención en la zona donde teóricamente se forma el foso (zona cercana al vértice de la derivación más aguas abajo).

La duración de este experimento es de unas 6 horas para alcanzar el equilibrio y es importante decir que es el de mayor duración, ya que los demás parten de unas condiciones donde el sistema está prácticamente equilibrado inicialmente, mientras que el primero se ha iniciado bajo condición de lecho plano. Como la capacidad de la tolva es insuficiente para trabajar este número de horas de forma seguida, ésta se debe ir rellenando periódicamente a lo largo de los ensayos, ya que si no la maquinaria se puede ver gravemente dañada. Además, como se alcanza un número elevado de horas, ha sido necesario emplear dos días para este ensayo (4,5 horas + 1,5 horas).

El caudal sólido se mide utilizando un tamiz que retiene los sedimentos de tamaño superior a 0,0063 mm de diámetro. Este tamiz se colocará a la salida de la tubería de cada rama durante 30 segundos. Este procedimiento también será de ayuda para comprobar que la uniformidad del sedimento es la correcta y para asegurarse de que dicho sedimento no pasa a través del tamiz.



Figura 50: Recogida de arena mediante el tamiz.

Seguidamente, el sedimento se retira del tamiz, se coloca en vasos metálicos y se seca en un horno a 105 °C durante 24 horas. Seguidamente se pesa cada cantidad, obteniendo el peso seco de cada muestra, con lo cual se puede obtener el caudal sólido vertido por cada ramal en cada uno de los instantes seleccionados. Las tomas de caudal sólido se han realizado cada media hora a lo largo de cada ensayo.



Figura 51: Secado de las muestras de arena en el horno a 105 grados.

La medición de caudal líquido resulta mucho más sencilla de realizar, ya que únicamente se tiene que observar los incrementos de nivel en los depósitos de salida de cada canal, situados aguas arriba de los vertederos. Con el simple procedimiento de medir el valor absoluto del nivel del tanque, realizar la diferencia con el nivel de referencia (correspondiente al nivel del vértice del aliviadero) y extraer el valor de caudal a partir de las gráficas obtenidas en la calibración, el cálculo está realizado. Como es una operación fácil y rápida de realizar a lo largo de los ensayos, se ha decidido tomar valores de caudales cada 15 minutos.

Por último, también se han realizado mediciones de niveles del lecho y del nivel de agua en la zona inferior del modelo (aguas abajo del desvío) en diferentes secciones separadas cada 25 cm, mediante el uso de cintas métricas transparentes colocadas en las paredes del canal.

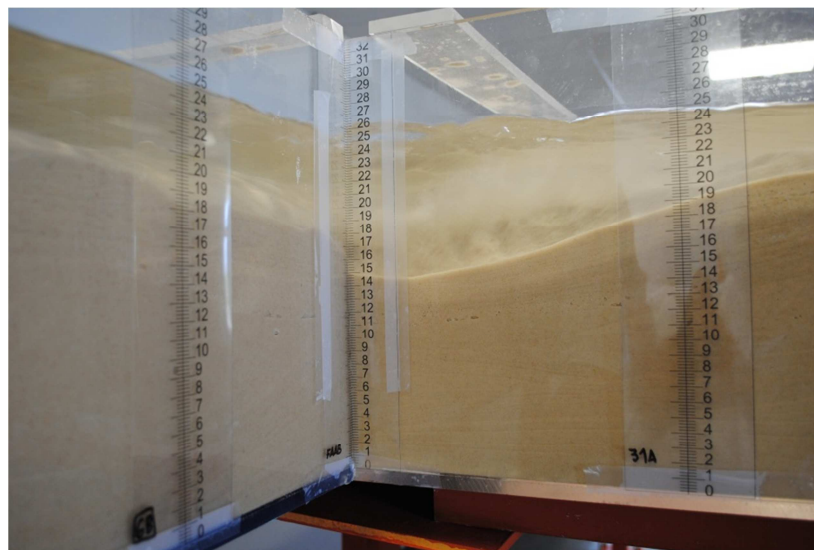


Figura 52: Cintas métricas colocadas en las paredes del canal cada 25 cm.

Además, debido al comportamiento característico del flujo a la entrada de la derivación, también se ha colocado cintas en lugares estratégicos, a fin de poder

determinar la evolución del foso situado alrededor del vértice más aguas abajo. Esta tarea será complementada mediante fotografías, que reflejan de una forma mucho más visual y global las condiciones a lo largo de los ensayos, observando las diferencias entre los diferentes instantes de tiempo. La toma de niveles y de fotografías se ha realizado 30 minutos.

Destacar que la primera medición, referente a caudales líquidos, se ha realizado 15 minutos después del inicio del ensayo, con el objetivo de realizar la toma de datos en un sistema relativamente más equilibrado que el inicial. Por otra parte, cada conjunto de medidas tiene una duración aproximada de unos 10 minutos (a excepción de la medición de caudal líquido, que es prácticamente inmediata) lo cual deja ciertos márgenes de tiempo entre actividades para comprobar otros elementos del modelo (como la revisión del nivel de sedimento en la tolva) o para analizar y discutir los resultados de los datos obtenidos.

El equilibrio se producirá cuando el caudal líquido y sólido a través de las dos ramas sea constante en el tiempo, es decir, que los caudales a la entrada del canal han de ser iguales a la suma de los caudales de salida en ambas ramas. No obstante, el equilibrio de caudal sólido es más complicado que se produzca, ya que la medición es menos precisa y el comportamiento menos uniforme. Sobre este aspecto, hace falta tener en cuenta que para establecer el momento de equilibrio será determinante la observación de la topografía del lecho en la zona de desvío, destacando sobre todo el foso que se forma alrededor del vértice del desvío aguas abajo y la zona de deposición de material a la entrada del canal lateral.

Respecto al segundo ensayo, destacar que el funcionamiento y los horarios de las actividades realizadas son las mismas que en el primero. Sin embargo, en éste se ha decidido aumentar el caudal líquido de entrada en el canal, adoptando un valor constante de 14,5 L/s, por encima del valor crítico de 14,25 L/s y manteniendo el caudal sólido constante, con el valor de 16,5 g/s. El objetivo principal de esta investigación, aparte de la obtención del reparto de caudales sólidos y líquidos y la morfología del lecho en diferentes instantes a lo largo del proceso, es sobre todo analizar las diferencias observadas entre el primer ensayo y el segundo, a fin de determinar los efectos producidos bajo unas y otras condiciones. En investigaciones previas, se ha determinado que bajo las condiciones del primer ensayo, la formación del foso se produce en las primeras horas de ensayo, pero a medida que se van alcanzando las condiciones de equilibrio, éste va desapareciendo, tendiendo a

formarse lecho plano. En cambio, bajo las segundas condiciones, el foso aumenta sus dimensiones de forma progresiva, pudiendo incluso llegar a la placa de metacrilato inferior antes de alcanzar el equilibrio. En caso de que esto sucediera, los resultados finales no serían válidos, ya que no es posible determinar a ciencia cierta cuál es la profundidad del foso una vez alcanzado el equilibrio.

Además de los datos obtenidos, y como se ha comentado anteriormente, el aporte de información fotográfica también servirá de gran ayuda para poder comparar ambas situaciones e identificar los diferentes patrones que ocurren, no solamente en la zona de la derivación, sino también en los tramos aguas abajo de la toma lateral.

3.4.2. Ensayos 3 y 4: Comportamiento del flujo y el sedimento con la colocación de paneles sumergidos

Una vez analizado el comportamiento del sistema bajo las condiciones que se han descrito en el apartado anterior, el siguiente paso será determinar cómo evoluciona el transporte de flujo y sedimento una vez colocados los paneles sumergidos. El objetivo principal de esta investigación consistirá en intentar solventar el problema de desequilibrio líquido y sólido que se produce en la derivación, fundamentalmente contrarrestando el flujo secundario que se produce en forma de vórtice generando otra corriente vorticiosa que sea similar a la anterior, pero que rote en sentido contrario. Como ya se ha comentado en el marco teórico, el flujo secundario producido por la derivación gira en un sentido horario, por lo que se deberá hacer una colocación de paneles que genere un vórtice anti horario. Una vez realizados los ensayos se observarán los efectos producidos y se compararán los resultados con los ensayos realizados con anterioridad.

Mediante el estudio de la teoría explicada en el apartado 2.2.3. se ha realizado el dimensionamiento de los paneles, obteniendo las siguientes dimensiones:

Tabla 14: Dimensiones calculadas de los paneles sumergidos.

Parámetro	Definición	Valor
α	Ángulo de desvío	20°
H	Altura de panel	1,5 cm
	Longitud de panel	9 cm (4,5cm)
T	Distancia parte superior panel-lámina de agua	3 cm
δ_b	Distancia panel-pared lateral	9 cm
δ_n	Distancia entre paneles (del mismo grupo)	4,5 cm
δ_s	Distancia entre grupos e paneles	22,cm

NOTA: La longitud de panel de 9 cm no corresponde al dimensionamiento realizado, pero a falta de personal cualificado que pudiera realizar el corte de éstos, se ha decidido seguir con la investigación utilizando este valor. Para futuros ensayos, la longitud de las placas será de 4,5 cm.

El tercer ensayo se ha realizado a modo de prueba para observar el comportamiento de los paneles dentro del sistema y determinar bajo qué condiciones funciona correctamente. Éstos se han implantado en el tramo recto aguas arriba de la derivación, colocando 3 grupos de 3 paneles a cada lado de la zona central, a unos 3,5 metros del desvío y con la cara de aguas abajo mirando hacia el centro del canal. En este sentido, hace falta destacar que el tipo de colocación propuesta pretende generar un flujo que sedimente las partículas en las zonas laterales, quedando la zona central erosionada y con un mayor calado. Esta línea de estudio va sobre todo encaminada a determinar si la implantación de paneles puede ser beneficiosa para la navegabilidad de los ríos que han perdido o pretenden ganar una cierta profundidad, por lo que será una de las líneas de investigación propuestas en el apartado 4.4.



Figura 53: Paneles colocados en el tramo recto del canal, aguas arriba de la derivación.

Los principales objetivos de esta investigación y sus actividades ligadas al comportamiento de paneles, se detallan a continuación:

- Analizar bajo qué condiciones los paneles trabajan de forma correcta. Teóricamente, esto es fácil de averiguar, ya que el buen funcionamiento de los paneles depende de si generan un vórtice justo aguas abajo o no. También será importante determinar simplemente si el vórtice se genera bajo alguna serie de condiciones, lo cual determinará si las dimensiones propuestas son factibles o si se debe realizar otro dimensionamiento.



Figura 54: Paneles en funcionamiento. Se observa el vórtice generado.

Para realizar esta calibración de paneles, se ha ido aumentando de forma progresiva el caudal líquido, subiendo la frecuencia del dispositivo que controla la bomba y empezando con un valor de 22,9 Hz que corresponde a un caudal de 8,6 L/s. Inicialmente, se ha subido la frecuencia en intervalos de 0,2 Hz pero al observar que no se producían cambios significativos, se ha decidido aumentar este incremento a 0,5 Hz hasta llegar al valor de 26,5 Hz correspondiente a un caudal de 14,6 L/s (un poco por encima al utilizado en el ensayo 2). Para estas condiciones se ha observado con claridad el vórtice generado por el sistema de paneles y, por lo tanto, se utilizarán para realizar el posterior experimento con la colocación de los paneles justo aguas arriba de la derivación. También se han realizado pruebas con el mismo caudal y diferentes calados colocando una pequeña presa de piedra a la salida del canal.

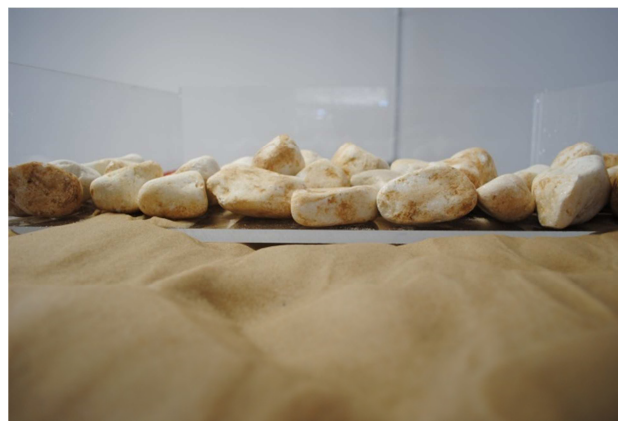


Figura 55: Pequeña presa de piedras colocada a la salida del canal principal para las pruebas del ensayo 3.

Además, también se ha anotado los valores de calado, velocidad y número de Reynolds para el análisis de la investigación y para realizar las correspondientes correcciones en cuanto al dimensionamiento de los paneles sumergidos.

- Determinar las condiciones finales del lecho. Una vez parado el ensayo, se ha realizado un estudio sobre las condiciones finales del lecho aguas abajo de los paneles, a fin de analizar los efectos producidos.

Para este proceso, se han realizado fotografías de las condiciones iniciales y finales, en algunas de las cuales se ha utilizado el aparato de visión laser para definir de forma más nítida la morfología del lecho de las diferentes secciones de la zona estudiada. Además, también se ha realizado una batimetría del estado final para observar y analizar de forma numérica los efectos producidos mediante datos medidos sobre la superficie del canal.

En el cuarto ensayo, el objetivo principal es determinar los cambios que se han producido en el sistema debido a la colocación de paneles, comparando los resultados con los obtenidos en el estado final del ensayo 2. De esta manera, se determinará si su colocación en el modelo produce unos cambios beneficiosos en la zona de la derivación, con el fin de poder solventar problemas reales como el descrito en la motivación del trabajo (apartado 1.2.).

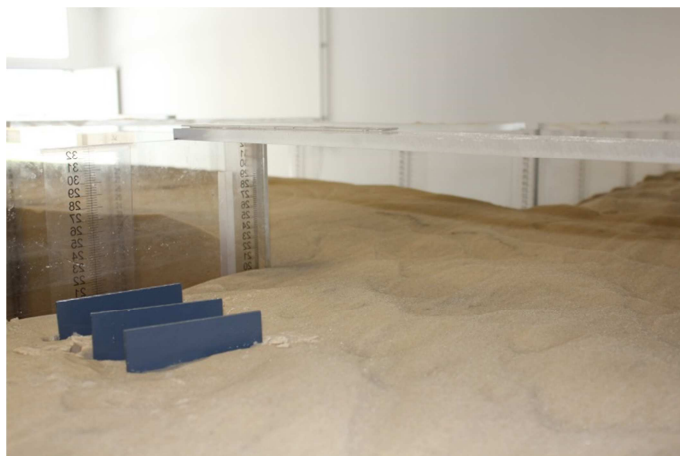


Figura 56: Ubicación de los paneles en el cuarto ensayo.

El procedimiento del ensayo es similar al del apartado anterior, en el sentido de la toma de fotografías y la realización de batimetrías en la zona afectada por la derivación. Además, se realizará una toma de caudales líquidos y sólidos aproximadamente media hora después del inicio del ensayo. El caudal líquido y sólido se mantendrá constante, con valores de 14,5 L/s y 16,5 g/s respectivamente y en este sentido, hace falta destacar que el aporte líquido es muy similar al observado al final del ensayo 3, por lo que el funcionamiento correcto de los paneles sumergidos está prácticamente asegurado. Los resultados se muestran en el siguiente apartado.

4. Resultados y conclusiones

4.1. Resultados

En este apartado se muestran los resultados relativos a los ensayos realizados, los cuales ya se han descrito de forma extensa en el capítulo anterior, en lo referente a la metodología de su ejecución. El objetivo es mostrar mediante los datos obtenidos en el laboratorio el especial comportamiento del flujo y del sedimento en la zona de la derivación y aguas abajo de ésta y su evolución en el tiempo, con la colocación de paneles sumergidos y sin ellos. Además, también se analizarán dichos datos mediante cálculos sencillos, gráficas, fotografías y en algunos casos perfiles batimétricos para valorar el reparto de caudal líquido y sólido por cada ramal en los intervalos determinados, con el objetivo de poder discutir y determinar de una forma más sencilla el comportamiento del sistema. Como en el apartado anterior, se separarán los resultados obtenidos en el sistema sin la colocación de paneles de los obtenidos con la implantación de éstos.

4.1.1. Comportamiento del sistema sin la colocación de paneles sumergidos

Determinar bajo qué condiciones el flujo y el sedimento se comporta de una forma u otra es de vital importancia para poder hacer un estudio detallado de la zona de la derivación. Para esta investigación, se ha determinado que existe un valor límite de caudal líquido (manteniendo el caudal sólido constante) que separa un comportamiento del otro. Este valor corresponde a un caudal de 14,25 L/s. A continuación se mostrarán los datos medidos en el laboratorio y los resultados obtenidos bajo unas condiciones de caudal por debajo del límite ($Q = 13,5$ L/s; ensayo 1) y por encima ($Q = 14,5$ L/s; ensayo 2), mediante el siguiente soporte:

- Tablas de valores y gráficos de la evolución del reparto del transporte sólido y líquido a lo largo de los ensayos.
- Tablas de valores y gráficos de la evolución de la morfología del lecho y del nivel de agua en las secciones ubicadas próximas a la zona del desvío. Destacar que los datos tomados no corresponden a la sección completa del canal, si no únicamente a los valores obtenidos en la pared donde están colocadas las cintas métricas. Se definirán unos perfiles aproximados de la zona afectada del canal principal y del lateral, así como la evolución de la

profundidad

del

foso.

- Fotografías del estado del lecho y del comportamiento del flujo en la zona de afectación a lo largo del transcurso del ensayo, para observar de forma más visual la información mostrada anteriormente. Se destacará principalmente la zona relativa al desvío, donde se forma el foso y sedimenta la arena.

Resultados del primer ensayo ($Q = 13,5$ L/s)

La evolución del transporte líquido en las dos ramas del sistema se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 15: Evolución del caudal líquido en el ramal principal para un caudal de 13,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.

Evolución de caudal líquido ramal principal ($Q = 13,5$ L/s)					
Toma	Hora	t acumulado (min)	Nivel abs. (cm)	Δh depósito (cm)	Q (L/s)
1	12:00	15	18,7	11,3	6,27
2	12:15	30	18,5	11,5	6,52
3	12:30	45	18,5	11,5	6,52
4	12:45	60	18,3	11,7	6,78
5	13:00	75	18,3	11,7	6,78
6	13:15	90	18,1	11,9	7,05
7	13:30	105	17,9	12,1	7,32
8	13:45	120	18,1	11,9	7,05
9	14:00	135	17,9	12,1	7,32
10	14:15	150	17,8	12,2	7,46
11	14:30	165	17,8	12,2	7,46
12	14:45	180	17,6	12,4	7,75
13	15:00	195	17,8	12,2	7,46
14	15:15	210	17,6	12,4	7,75
15	15:30	225	17,7	12,3	7,60
16	15:45	240	17,8	12,2	7,46
17	12:45	255	17,7	12,3	7,60
18	13:00	270	17,5	12,5	7,89
19	13:15	285	17,5	12,5	7,89
20	13:30	300	17,6	12,4	7,75
21	13:45	315	17,5	12,5	7,89
22	14:00	330	17,6	12,4	7,75

Tabla 16: Evolución del caudal líquido en la rama lateral para un caudal de 13,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.

Evolución del caudal líquido ramal lateral (Q entrada) = 13,5 L/s					
Toma	Hora	t acumulado (min)	Nivel abs. (cm)	Δh depósito (cm)	Q (L/s)
1	12:01	16	21,6	8,4	3,16
2	12:16	31	21,9	8,1	2,92
3	12:31	46	22,1	7,9	2,77
4	12:46	61	22,3	7,7	2,62
5	13:01	76	22,4	7,6	2,55
6	13:16	91	22,7	7,3	2,34
7	13:31	106	23,1	6,9	2,08
8	13:46	121	23,1	6,9	2,08
9	14:01	136	23,2	6,8	2,02
10	14:16	151	23,2	6,8	2,02
11	14:31	166	23,3	6,7	1,96
12	14:46	181	23,6	6,4	1,78
13	15:01	196	23,4	6,6	1,90
14	15:16	211	23,7	6,3	1,73
15	15:31	226	23,7	6,3	1,73
16	15:46	241	23,5	6,5	1,84
17	12:46	256	23,9	6,1	1,62
18	13:01	271	24,1	5,9	1,51
19	13:16	286	23,9	6,1	1,62
20	13:31	301	23,9	6,1	1,62
21	13:46	316	23,7	6,3	1,73
22	14:01	331	23,7	6,3	1,73

Tabla 17: Evolución del reparto de caudales líquidos entre las dos ramas, para un caudal de 13,5 L/s. Se muestra el aporte líquido de cada una de ellas, el caudal total de salida, el porcentaje de cada ramal respecto al total y la relación entre los caudales.

Reparto de caudales líquidos (Q entrada = 13,5 L/s)							
Toma	t transcurrido (min)	Q pral. (L/s)	Q lat. (L/s)	Q total (L/s)	% Q pral.	% Q lat.	Q pral/Q lat
1	15	6,27	3,16	9,43	66,5	33,5	2,0
2	30	6,52	2,92	9,45	69,1	30,9	2,2
3	45	6,52	2,77	9,29	70,2	29,8	2,4
4	60	6,78	2,62	9,41	72,1	27,9	2,6
5	75	6,78	2,55	9,34	72,7	27,3	2,7
6	90	7,05	2,34	9,40	75,1	24,9	3,0
7	105	7,32	2,08	9,41	77,9	22,1	3,5
8	120	7,05	2,08	9,14	77,2	22,8	3,4
9	135	7,32	2,02	9,35	78,4	21,6	3,6
10	150	7,46	2,02	9,48	78,7	21,3	3,7
11	165	7,46	1,96	9,42	79,2	20,8	3,8
12	180	7,75	1,78	9,53	81,3	18,7	4,3
13	195	7,46	1,90	9,36	79,7	20,3	3,9
14	210	7,75	1,73	9,47	81,8	18,2	4,5
15	225	7,60	1,73	9,33	81,5	18,5	4,4
16	240	7,46	1,84	9,30	80,2	19,8	4,1
17	255	7,60	1,62	9,22	82,5	17,5	4,7
18	270	7,89	1,51	9,40	83,9	16,1	5,2
19	285	7,89	1,62	9,51	83,0	17,0	4,9
20	300	7,75	1,62	9,36	82,7	17,3	4,8
21	315	7,89	1,73	9,62	82,0	18,0	4,6
22	330	7,75	1,73	9,47	81,8	18,2	4,5

Además, también se han realizado dos gráficas distintas: Una de ellas muestra la evolución del caudal sólido por ambas ramas a lo largo del ensayo y la otra la evolución de la relación entre caudales:

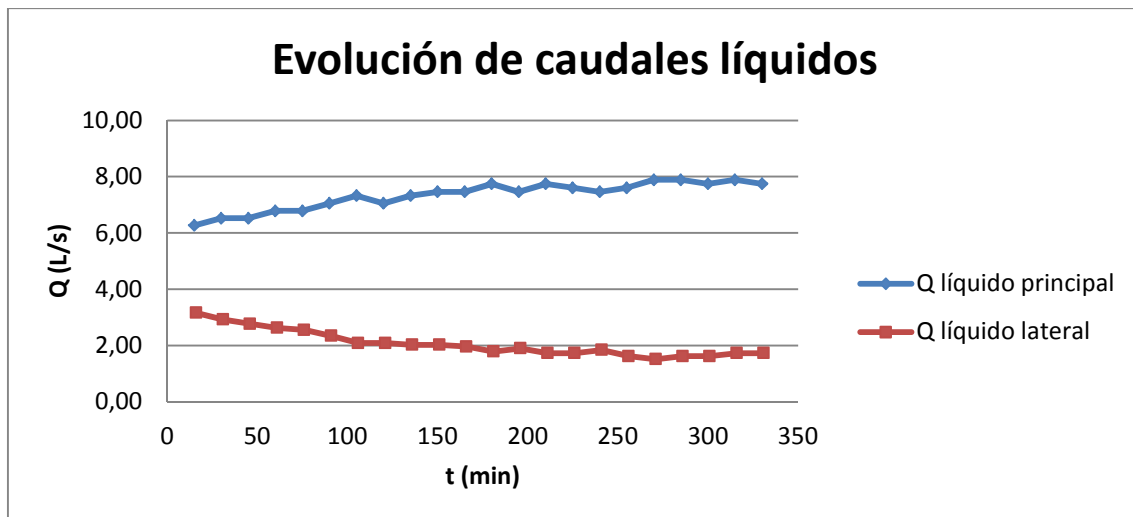


Figura 57: Evolución de caudales líquidos de salida por cada ramal para un caudal de entrada de 13,5 L/s.

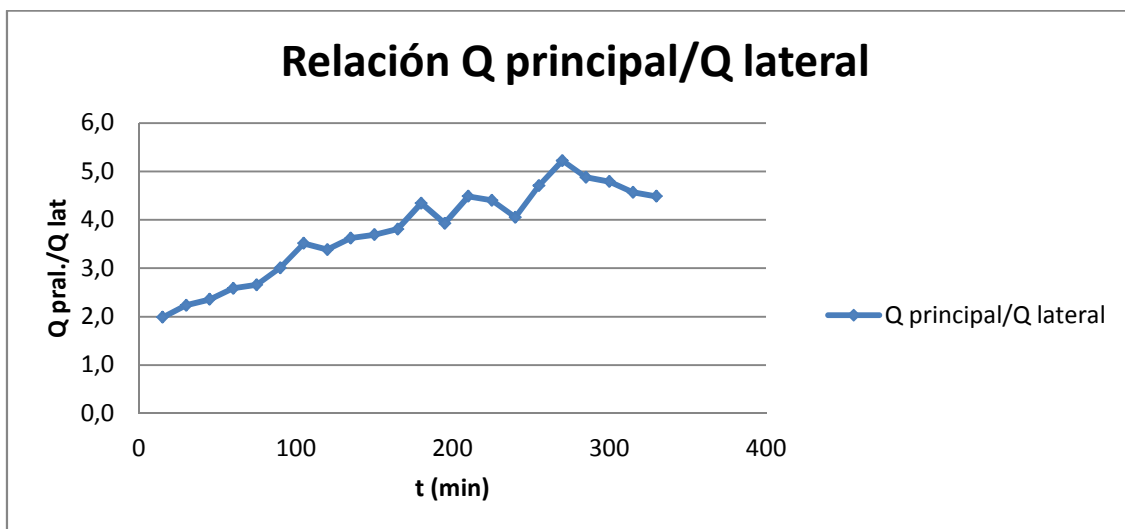


Figura 58: Evolución de la relación de caudales de cada rama para un caudal líquido de entrada de 13,5 L/s.

Otro parámetro analizado ha sido la evolución del transporte de sedimento por ambos ramales. Los resultados obtenidos siguen la misma línea de trabajo que en el caso anterior y se detallan a continuación:

Tabla 18: Evolución del caudal sólido en el ramal principal para un caudal de 13,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.

Evolución del caudal sólido ramal principal (Q = 13,5 L/s)					
Toma	Hora	t transcurrido (min)	Δt toma (s)	Peso seco (g)	qs (g/s)
1	12:15	30	30	68,59	2,29
2	12:45	60	30	113,32	3,78
3	13:15	90	30	94,5	3,15
4	13:45	120	30	117,45	3,92
5	14:15	150	30	188,44	6,28
6	14:45	180	30	222,27	7,41
7	15:15	210	30	169,72	5,66
8	15:45	240	30	257	8,57
9	13:00	270	30	274,24	9,14
10	13:30	300	30	328,39	10,95
11	14:00	330	30	403,24	13,44

Tabla 19: Evolución del caudal líquido en el ramal principal para un caudal de 13,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.

Evolución del caudal sólido ramal lateral (Q = 13,5 L/s)					
Toma	Hora	t transcurrido (min)	Δt toma (s)	Peso seco (g)	qs (g/s)
1	12:20	35	30	87,92	2,93
2	12:50	65	30	107,22	3,57
3	13:20	95	30	90,61	3,02
4	13:50	125	30	123,73	4,12
5	14:20	155	30	98,12	3,27
6	14:50	185	30	200,51	6,68
7	15:20	215	30	75,87	2,53
8	15:50	245	30	150,5	5,02
9	13:05	275	30	97,62	3,25
10	13:35	305	30	185,06	6,17
11	14:05	335	30	144	4,80

Tabla 20: Evolución del reparto de caudales sólidos entre las dos ramas, para un caudal de 13,5 L/s. Se muestra el aporte líquido de cada una de ellas, el caudal total de salida, el porcentaje de cada ramal respecto al total y la relación entre los caudales.

Reparto de caudales sólidos (Q = 13,5 L/s)								
Toma	Hora	t transcurrido (s)	qs pral. (g/s)	qs lat. (g/s)	qs total (g/s)	% qs pral.	% qs lat.	qs pral/qs lat
1	12:15	30	2,29	2,93	5,22	43,8	56,2	0,8
2	12:45	60	3,78	3,57	7,35	51,4	48,6	1,1
3	13:15	90	3,15	3,02	6,17	51,1	48,9	1,0
4	13:45	120	3,92	4,12	8,04	48,7	51,3	0,9
5	14:15	150	6,28	3,27	9,55	65,8	34,2	1,9
6	14:45	180	7,41	6,68	14,09	52,6	47,4	1,1
7	15:15	210	5,66	2,53	8,19	69,1	30,9	2,2
8	15:45	240	8,57	5,02	13,58	63,1	36,9	1,7
9	16:15	270	9,14	3,25	12,40	73,7	26,3	2,8
10	16:45	300	10,95	6,17	17,12	64,0	36,0	1,8
11	17:15	330	13,44	4,80	18,24	73,7	26,3	2,8

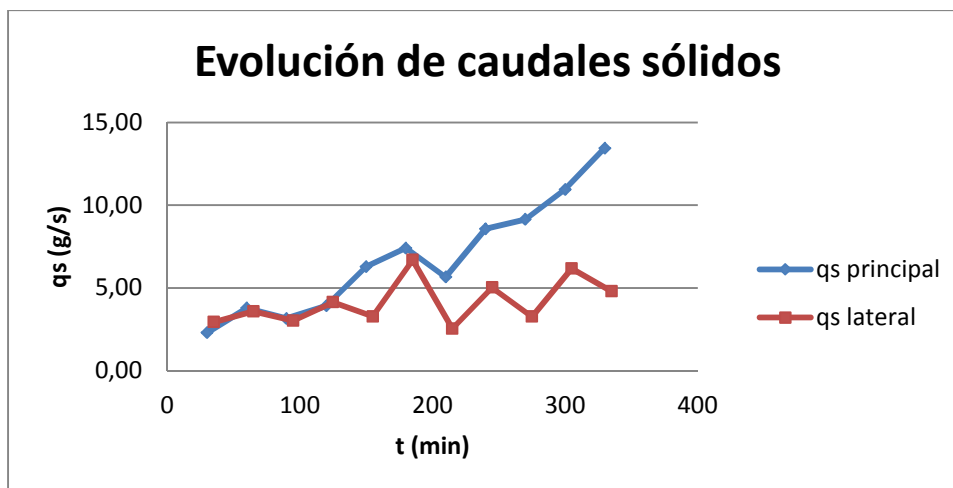


Figura 59: Evolución de caudales sólidos de salida por cada ramal para un caudal de entrada de 13,5 L/s.

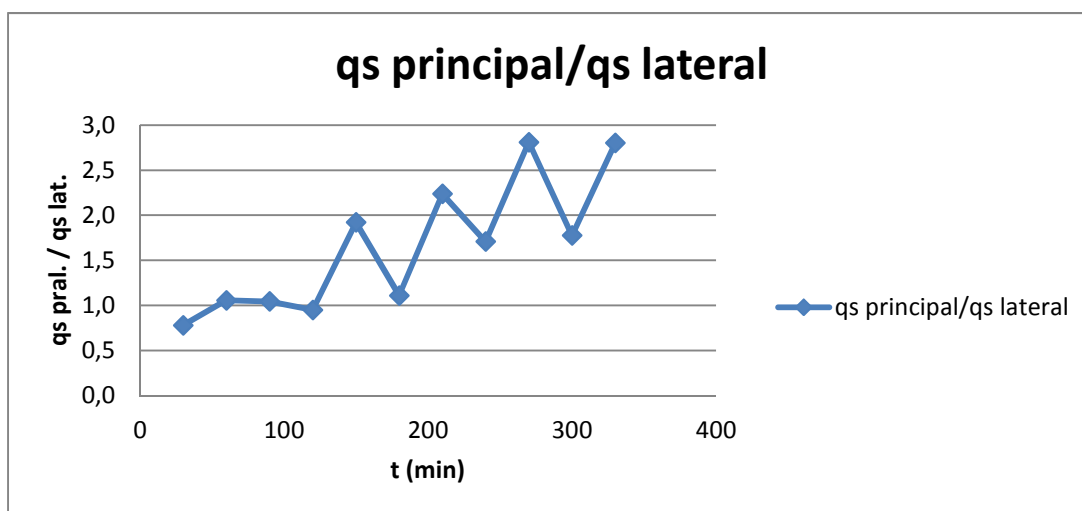


Figura 60: Evolución de la relación de caudales sólidos de cada rama para un caudal líquido de entrada de 13,5 L/s.

También se ha realizado la toma de los niveles de cotas y calados en diferentes secciones que se encuentran en la zona próxima a la derivación. En concreto, se ha dividido esta zona en el tramo del canal principal, el tramo del ramal lateral y la zona cercana al foso. A continuación se muestran los datos y perfiles obtenidos:

Tabla 21: Cotas y calados de las diferentes secciones situadas en el canal principal, en las condiciones iniciales y finales del ensayo.

Perfiles del canal principal							
Condiciones iniciales				Condiciones finales			
Sección	x	z	z+y	Sección	x	z	z+y
10	0	20,4	23,9	10	0	20,2	24,5
9	0,25	19,2	23,8	9	0,25	20,6	24
8	0,5	20,4	23,7	8	0,5	19,7	24,2
7	0,75	20,5	23,6	7	0,75	20,5	24,3
6	1	21,3	24,5	6	1	20,3	23,7

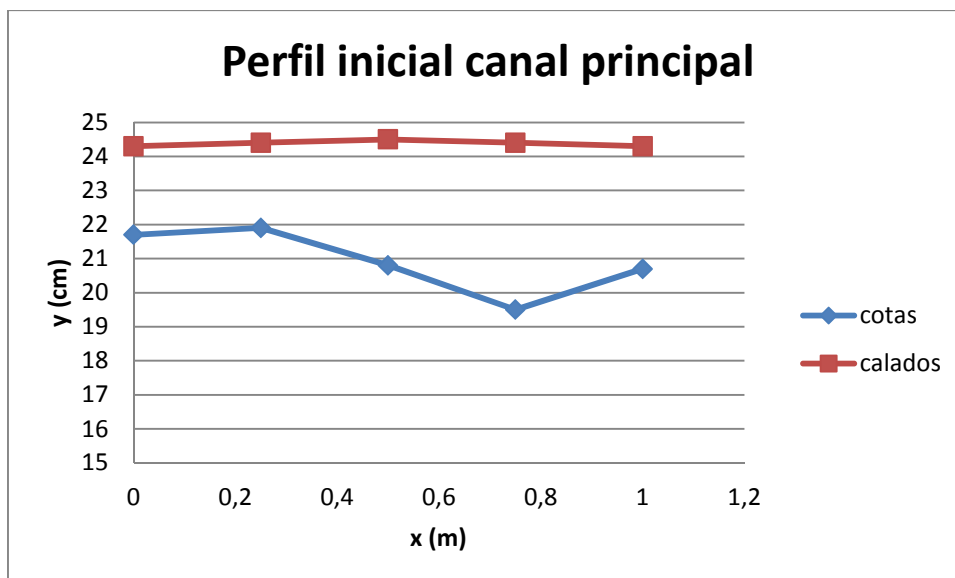


Figura 61: Perfil inicial de cotas y calados en el tramo situado en el canal principal.

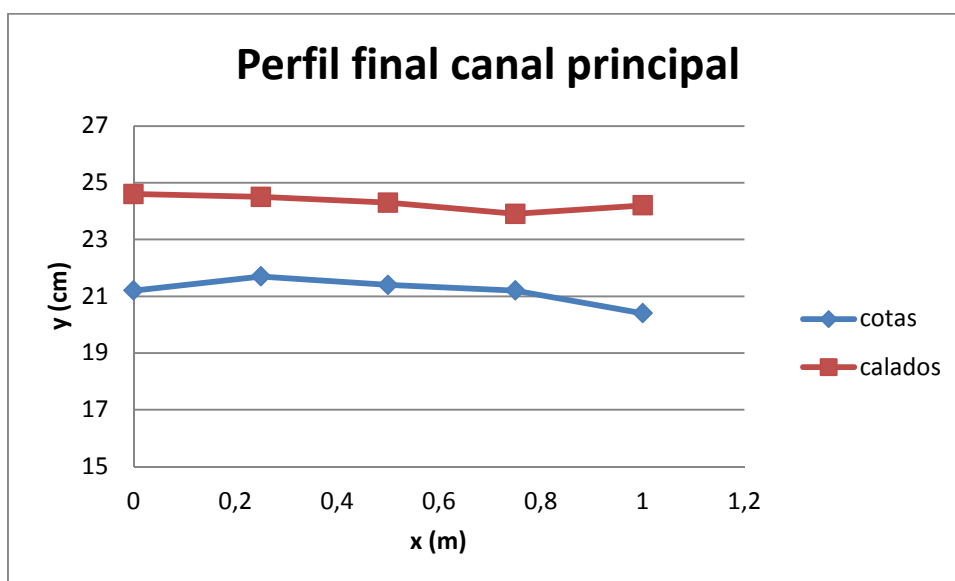


Figura 62: Perfil final de cotas y calados en el tramo situado en el canal principal.

Tabla 22: Cotas y calados de las diferentes secciones situadas en el canal lateral, en las condiciones iniciales y finales del ensayo.

Perfiles del canal lateral							
Condiciones iniciales				Condiciones finales			
Sección	x	z	z+y	Sección	x	z	z+y
31	0	21	22,8	31	0	22,8	23,2
32	0,25	20,2	22,8	32	0,25	22	22,2
33	0,5	21,6	22,6	33	0,5	21,6	22,2
34	0,75	20,4	22,4	34	0,75	20,4	22
35	1	19,8	22,2	35	1	20,2	21,8

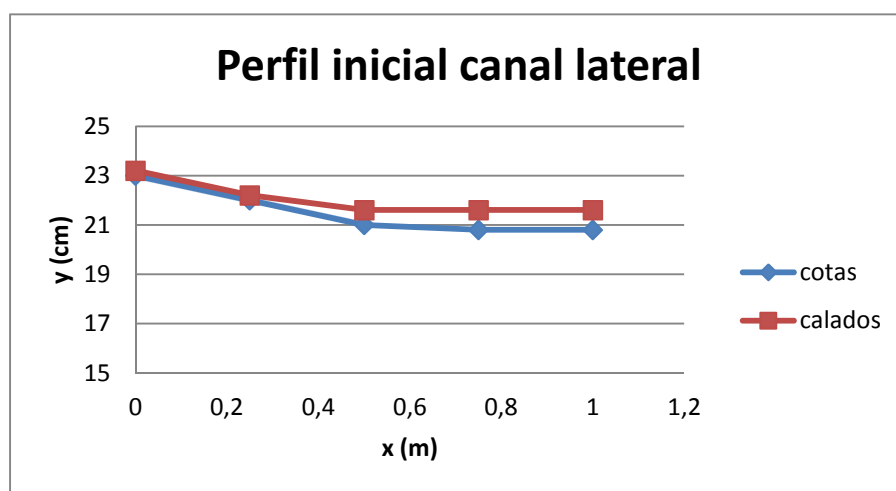


Figura 63: Perfil inicial de cotas y calados en el tramo situado en el canal lateral.

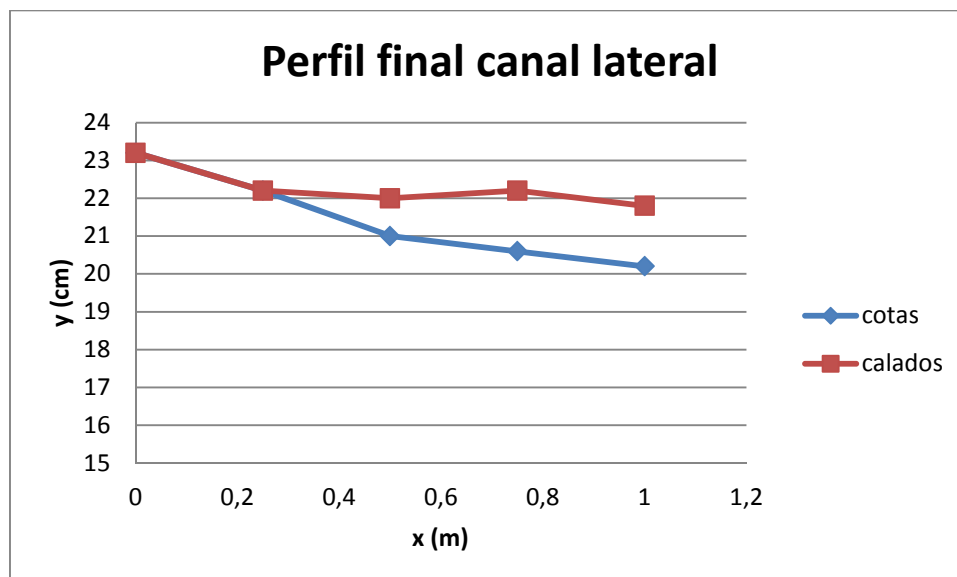


Figura 64: Perfil final de cotas y calados en el tramo situado en el canal lateral.

Tabla 23: Cotas y calados de las diferentes secciones situadas en la zona del foso, en las condiciones iniciales y finales del ensayo.

Perfiles del foso							
Condiciones iniciales				Condiciones finales			
Sección	x	z	z+y	Sección	x	z	z+y
6b	0	19,2	24,8	6b	0	19	25
FAA	0,25	14,6	25,4	FAA	0,25	15,8	26,2
31a	0,5	14,4	24,8	31a	0,5	18,8	25

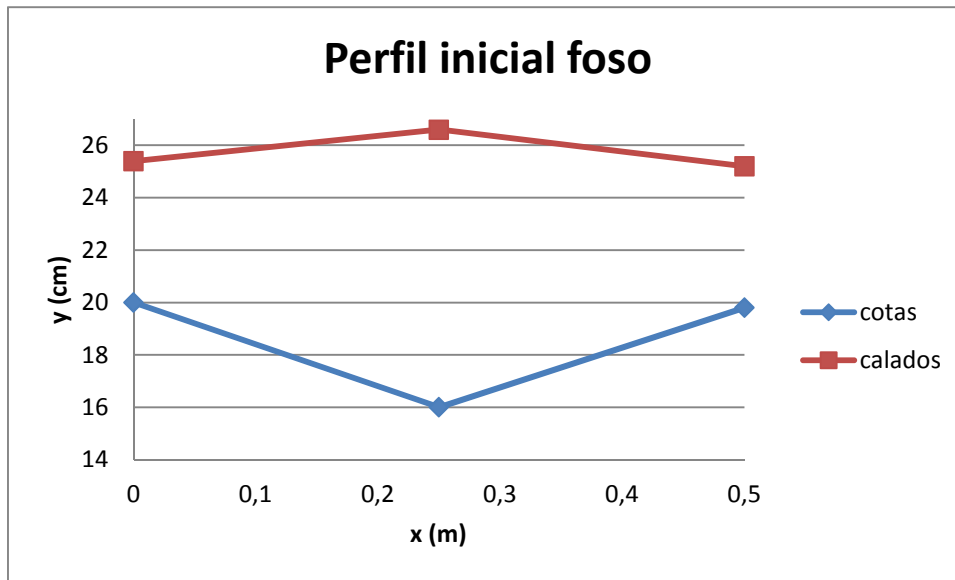


Figura 65: Perfil inicial de cotas y calados en la zona del foso.

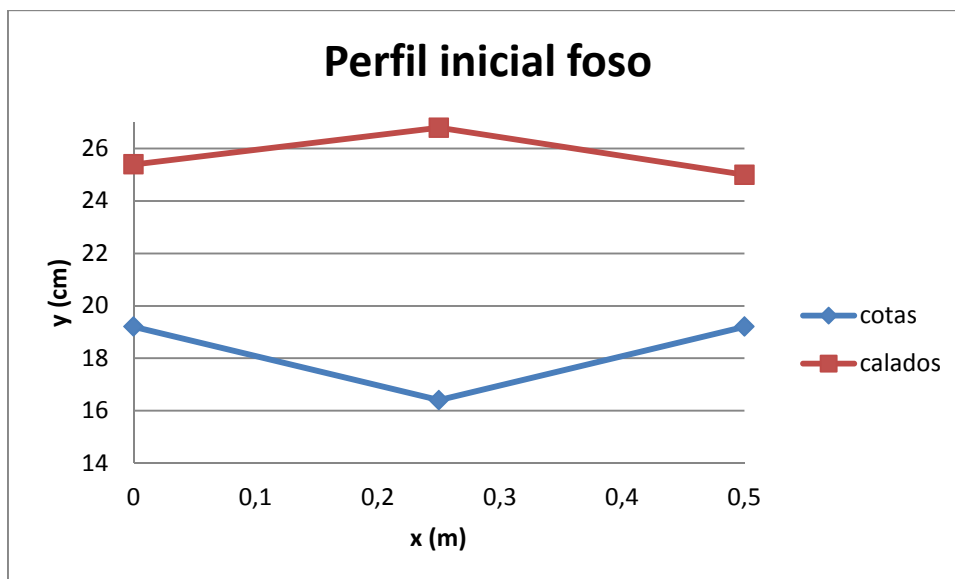


Figura 66: Perfil final de cotas y calados en la zona del foso.

Se adjunta también fotografías del foso, en las cuales se puede apreciar cómo se ha generado inicialmente, para luego volver a tender hacia el lecho plano:

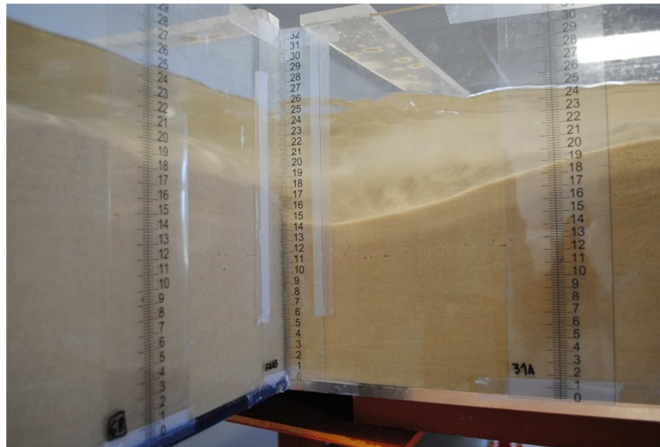


Figura 67: Foto del foso en los primeros instantes del ensayo.

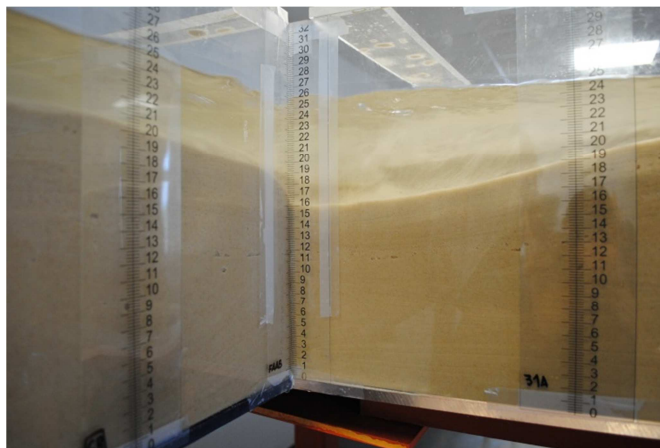


Figura 68: Foto del foso en los instantes finales del ensayo. Se observa como tiende al estado de lecho plano.

Resultados del segundo ensayo ($Q = 14,5 \text{ L/s}$)

Los resultados obtenidos relativos al segundo ensayo, en el cual se ha utilizado un valor de caudal por encima del valor límite, se detallarán de la misma manera que en el caso anterior, a fin de poder visualizar las diferencias entre unas condiciones y otras.

➤ Evolución del transporte líquido y sólido (tablas de resultados y gráficos)

Tabla 24: Evolución del caudal líquido en el ramal principal para un caudal de 14,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.

Evolución de caudal líquido ramal principal (Q = 14,5 L/s)					
Toma	Hora	t acumulado (min)	Nivel abs. (cm)	Δh depósito (cm)	Q (L/s)
1	14:15	15	17,2	12,8	8,33
2	14:30	30	17,2	12,8	8,33
3	14:45	45	17,3	12,7	8,18
4	15:00	60	17,4	12,6	8,03
5	15:15	75	17,3	12,7	8,18
6	15:30	90	17,2	12,8	8,33
7	15:45	105	17,3	12,7	8,18
8	16:00	120	17,4	12,6	8,03
9	16:15	135	17,2	12,8	8,33
10	16:30	150	17,3	12,7	8,18
11	16:45	165	17,4	12,6	8,03
12	17:00	180	17,4	12,6	8,03
13	17:15	195	17,4	12,6	8,03
14	17:30	210	17,4	12,6	8,03

Tabla 25: Evolución del caudal líquido en el ramal lateral para un caudal de 14,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.

Evolución del caudal líquido ramal lateral (Q entrada) = 14,5 L/s)					
Toma	Hora	t acumulado (min)	Nivel abs. (cm)	Δh depósito (cm)	Q (L/s)
1	14:16	16	24,3	5,7	1,41
2	14:31	31	24	6	1,56
3	14:46	46	24,1	5,9	1,51
4	15:01	61	23,8	6,2	1,67
5	15:16	76	24	6	1,56
6	15:31	91	24,1	5,9	1,51
7	15:46	106	24	6	1,56
8	16:01	121	24,1	5,9	1,51
9	16:16	136	23,9	6,1	1,62
10	16:31	151	24,1	5,9	1,51
11	16:46	166	23,9	6,1	1,62
12	17:01	181	23,9	6,1	1,62
13	17:16	196	23,7	6,3	1,73
14	17:31	211	23,9	6,1	1,62

Tabla 26: Evolución del reparto de caudales líquidos entre las dos ramas, para un caudal de 14,5 L/s. Se muestra el aporte líquido de cada una de ellas, el caudal total de salida, porcentajes respecto al total y la relación entre los caudales de cada ramal.

Reparto de caudales líquidos (Q entrada = 14,5 L/s)							
Toma	transcurrido (min)	Q pral. (L/s)	Q lat. (L/s)	Q total (L/s)	% Q pral.	% Q lat.	Q pral/Q lat
1	15	8,33	1,41	9,74	85,5	14,5	5,9
2	30	8,33	1,56	9,89	84,2	15,8	5,3
3	45	8,18	1,51	9,69	84,4	15,6	5,4
4	60	8,03	1,67	9,71	82,8	17,2	4,8
5	75	8,18	1,56	9,74	84,0	16,0	5,2
6	90	8,33	1,51	9,84	84,6	15,4	5,5
7	105	8,18	1,56	9,74	84,0	16,0	5,2
8	120	8,03	1,51	9,55	84,2	15,8	5,3
9	135	8,33	1,62	9,95	83,7	16,3	5,2
10	150	8,18	1,51	9,69	84,4	15,6	5,4
11	165	8,03	1,62	9,65	83,2	16,8	5,0
12	180	8,03	1,62	9,65	83,2	16,8	5,0
13	195	8,03	1,73	9,76	82,3	17,7	4,7
14	210	8,03	1,62	9,65	83,2	16,8	5,0

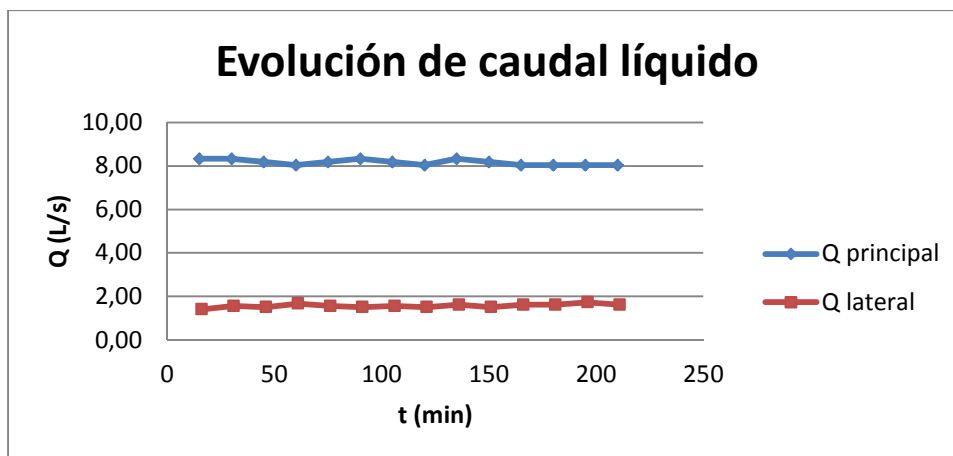


Figura 69: Evolución de caudales líquidos de salida por cada ramal para un caudal de entrada de 14,5 L/s.

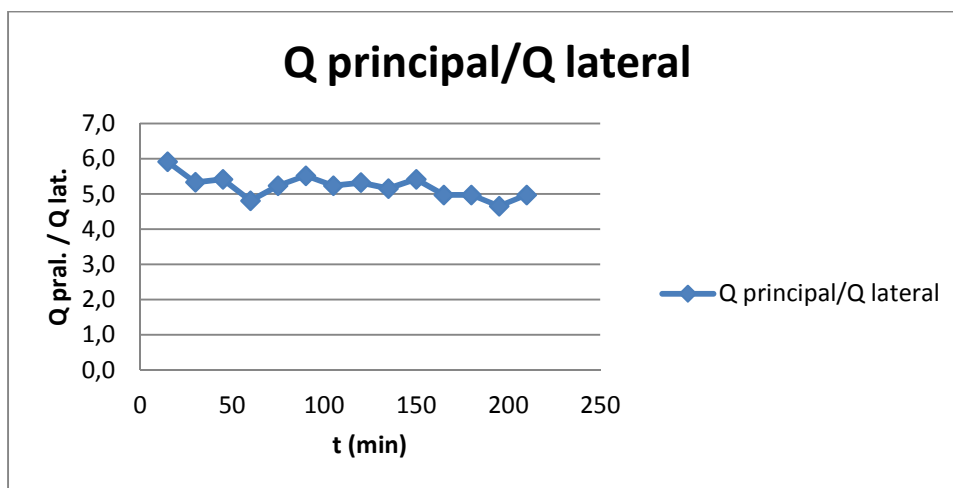


Figura 70: Evolución de la relación de caudales de cada rama para un caudal líquido de entrada de 14,5 L/s.

Tabla 27: Evolución del caudal sólido en el ramal principal para un caudal de 14,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.

Evolución del caudal sólido ramal principal (Q = 14,5 L/s)					
Toma	Hora	t transcurrido (min)	Δt toma (s)	Peso seco (g)	qs (g/s)
1	14:30	30	30	393,85	13,13
2	15:00	60	20	278,14	13,91
3	15:30	90	20	248,23	12,41
4	16:00	120	20	243,34	12,17
5	16:30	150	20	224,41	11,22
6	17:00	180	20	276,66	13,83
7	17:30	210	20	326,03	16,30

Tabla 28: Evolución del caudal sólido en el ramal lateral para un caudal de 14,5 L/s. Además, también se muestran los datos tomados a lo largo del ensayo.

Evolución del caudal sólido ramal lateral (Q = 14,5 L/s)					
Toma	Hora	t transcurrido (min)	Δt toma (s)	Peso seco (g)	qs (g/s)
1	14:35	35	30	181,83	6,06
2	15:05	65	20	110,12	5,51
3	15:35	95	20	105,65	5,28
4	16:05	125	20	151,69	7,58
5	16:35	155	20	95,06	4,75
6	17:05	185	20	86,83	4,34
7	17:35	215	20	140,78	7,04

Tabla 29: Evolución del reparto de caudales sólidos entre las dos ramas, para un caudal de 14,5 L/s. Se muestra el aporte líquido de cada una de ellas, el caudal total de salida, el porcentaje de cada ramal respecto al total y la relación entre los caudales.

Reparto de caudales sólidos (Q = 14,5 L/s)								
Toma	Hora	t transcurrido (s)	qs pral. (g/s)	qs lat. (g/s)	qs total (g/s)	% qs pral.	% qs lat.	qs pral/qs lat
1	12:15	30	13,13	6,06	19,19	68,4	31,6	2,2
2	12:45	60	13,91	5,51	19,41	71,6	28,4	2,5
3	13:15	90	12,41	5,28	17,69	70,1	29,9	2,3
4	13:45	120	12,17	7,58	19,75	61,6	38,4	1,6
5	14:15	150	11,22	4,75	15,97	70,2	29,8	2,4
6	14:45	180	13,83	4,34	18,17	76,1	23,9	3,2
7	15:15	210	16,30	7,04	23,34	69,8	30,2	2,3

➤ Perfiles en la zona afectada por la derivación

Tabla 30: Cotas y calados de las diferentes secciones situadas en el canal principal, en las condiciones iniciales y finales del ensayo.

Perfiles del canal principal							
Condiciones iniciales				Condiciones finales			
Sección	x	z	z+y	Sección	x	z	z+y
10	0	21,7	24,3	10	0	21,2	24,6
9	0,25	21,9	24,4	9	0,25	21,7	24,5
8	0,5	20,8	24,5	8	0,5	21,4	24,3
7	0,75	19,5	24,4	7	0,75	21,2	23,9
6	1	20,7	24,3	6	1	20,4	24,2

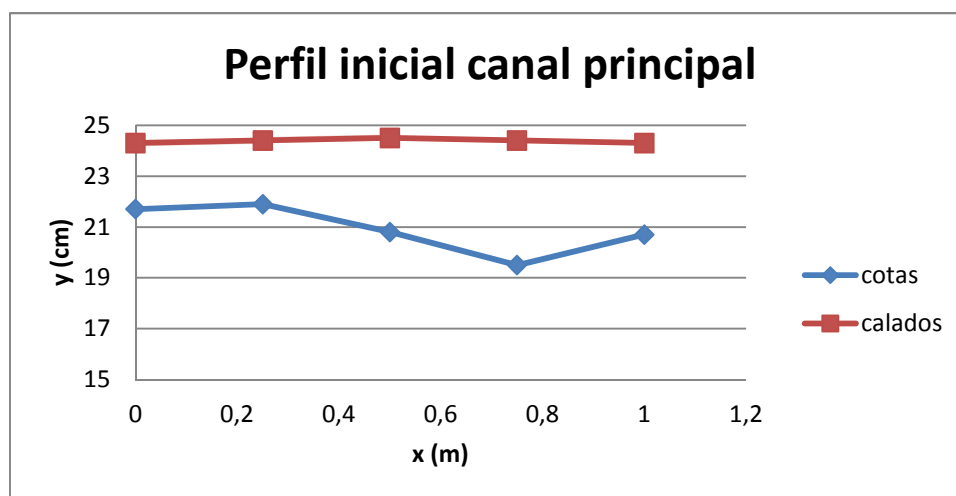


Figura 71: Perfil inicial de cotas y calados en el tramo situado en el canal principal.

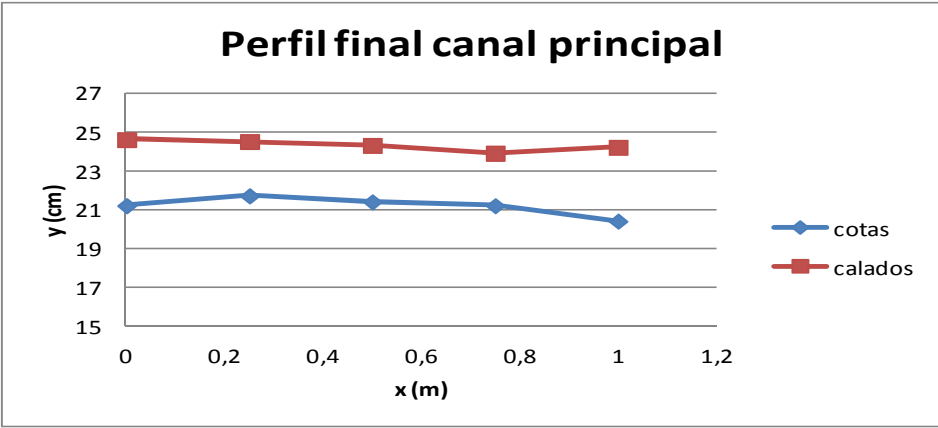


Figura 72: Perfil final de cotas y calados en el tramo situado en el canal principal.

Tabla 31: Cotas y calados de las diferentes secciones situadas en el canal lateral, en las condiciones iniciales y finales del ensayo.

Perfiles del canal lateral							
Condiciones iniciales				Condiciones finales			
Sección	x	z	z+y	Sección	x	z	z+y
31	0	23	23,2	31	0	23,2	23,2
32	0,25	22	22,2	32	0,25	22,2	22,2
33	0,5	21	21,6	33	0,5	21	22
34	0,75	20,8	21,6	34	0,75	20,6	22,2
35	1	20,8	21,6	35	1	20,2	21,8

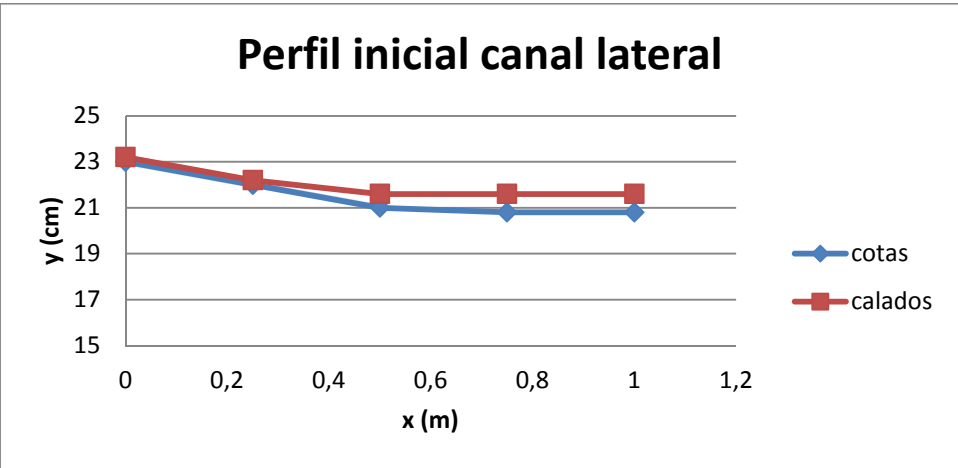


Figura 73: Perfil inicial de cotas y calados en el tramo situado en el canal lateral.

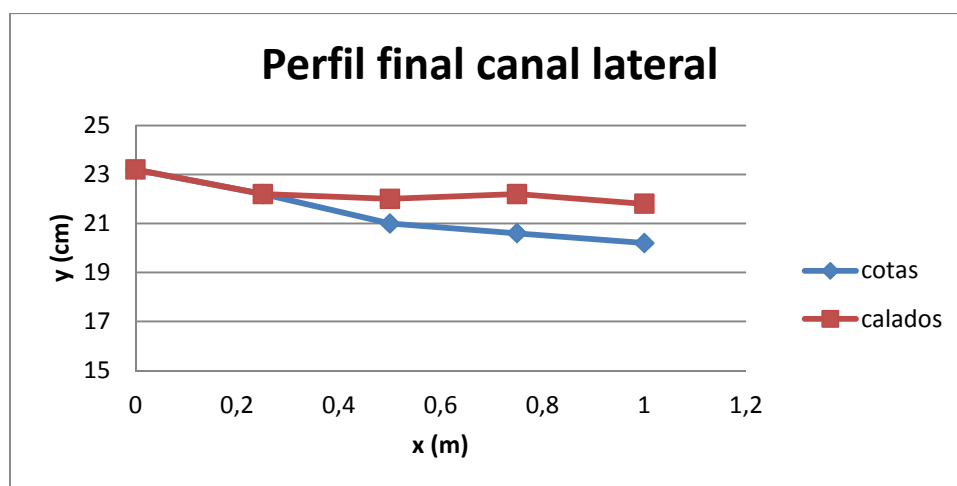


Figura 74: Perfil final de cotas y calados en el tramo situado en el canal lateral.

Tabla 32: Cotas y calados de las diferentes secciones situadas en el foso, en las condiciones iniciales y finales del ensayo.

Perfiles del foso							
Condiciones iniciales				Condiciones finales			
Sección	x	z	z+y	Sección	x	z	z+y
6b	0	20	25,4	6b	0	19,2	25,4
FAA	0,25	16	26,6	FAA	0,25	16,4	26,8
31a	0,5	19,8	25,2	31a	0,5	19,2	25

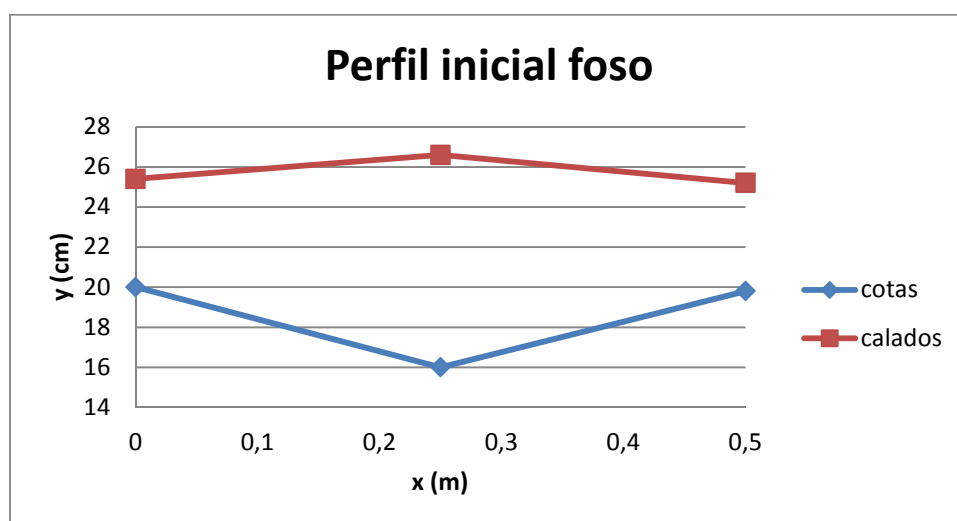


Figura 75: Perfil inicial de cotas y calados en el tramo situado en el foso.

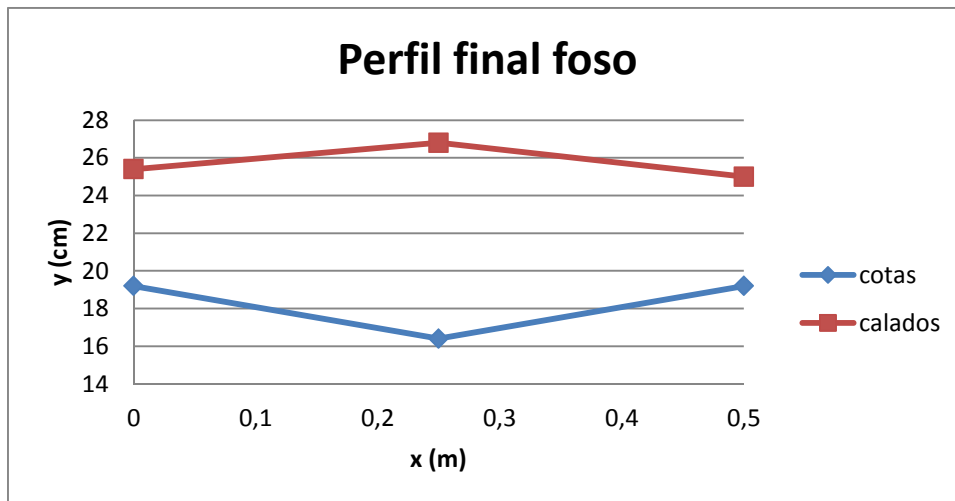


Figura 76: Perfil final de cotas y calados en el tramo situado en el foso.

- Cronología fotográfica (foto del foso + estado final derivación).



Figura 77: Estado del foso en los instantes iniciales del ensayo.

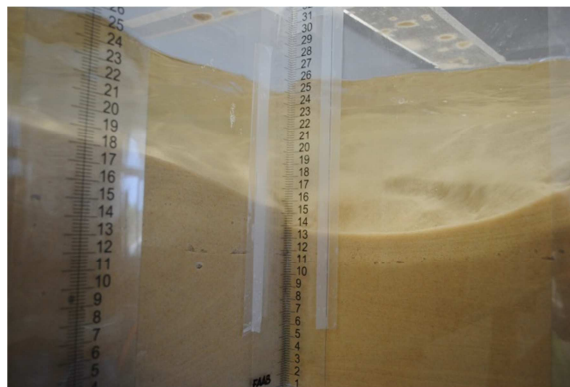


Figura 78: Estado del foso en los instantes finales. Se observa como éste ha aumentado su profundidad.



Figura 79: Estado final de la derivación después del ensayo. Hace falta destacar la presencia de grandes islas a la entrada de la zona de desvío.

4.2.1. Comportamiento del sistema con la colocación de paneles sumergidos

La colocación de paneles dentro del sistema produce unos efectos teóricos que se han debido contrastar mediante la observación de la topografía del lecho aguas abajo de su ubicación. En este apartado se detallan los resultados referentes al ensayo previo realizado en el tramo recto del canal principal, que no se ve afectada por la derivación (ensayo 3) y al realizado posteriormente en la zona de desvío.

Resultados del tercer ensayo: Efectos en el tramo recto del canal

En este apartado se detallan los resultados obtenidos en el ensayo de prueba de los paneles sumergidos que tenía por finalidad conocer bajo qué condiciones la morfología de los paneles produce efectos destacados en el comportamiento del flujo. Destacar que dichos efectos se han obtenido para un valor de caudal de 14,6 L/s. A continuación se muestran los datos obtenidos referentes al calado medido para cada caudal, así como las diferentes velocidades y números Reynolds:

Tabla 33: Parámetros calculados en la prueba de funcionamiento de los paneles.

frecuencia (Hz)	Q (L/s)	y (m)	b (m)	v (m/s)	Nº Reynolds
22,90	0,0086	0,049	0,60	0,29	50409,36
23,10	0,0090	0,050	0,60	0,30	52514,62
23,30	0,0093	0,050	0,60	0,31	54561,40
23,50	0,0097	0,049	0,60	0,33	56666,67
23,70	0,0100	0,049	0,60	0,34	58713,45
23,90	0,0104	0,050	0,60	0,35	60701,75
24,50	0,0114	0,052	0,60	0,37	66666,67
25,00	0,0122	0,061	0,60	0,33	71520,47
25,50	0,0130	0,054	0,60	0,40	76198,83
26,00	0,0138	0,056	0,60	0,41	80760,23
26,50	0,0146	0,030	0,60	0,81	85204,68

Además, también se ha realizado una batimetría de la zona afecta aguas abajo de los paneles, que se ha esquematizado mediante una vista en 3D.

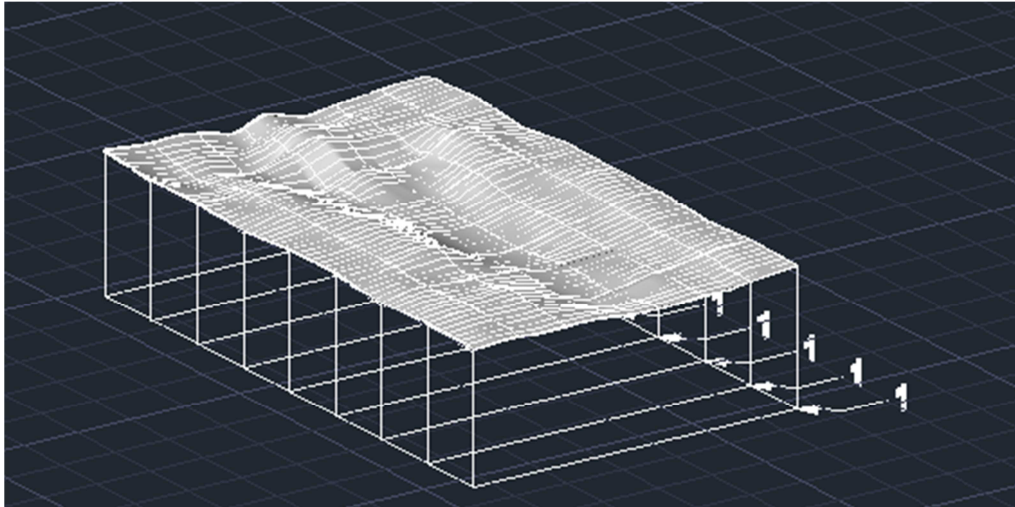


Figura 80: Batimetría realizado mediante vista 3D de la zona afectada por los paneles.

Para acabar, y como en el resto de apartados referentes a resultados, se adjuntan diversas fotografías, en algunas de las cuales se ha realizado una toma de la sección mediante un dispositivo laser que muestra los cambios generados en el lecho de una forma mucho más clara:

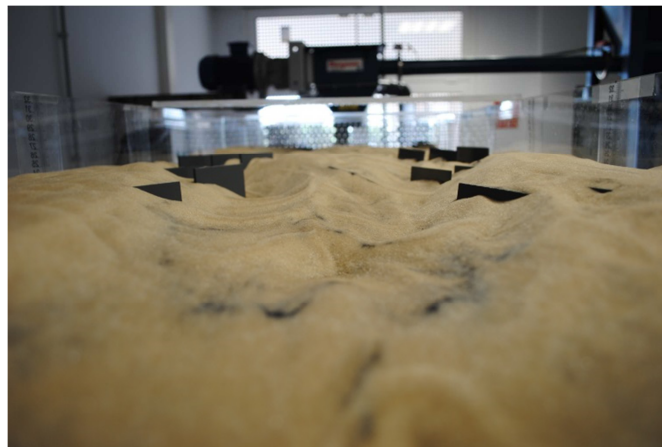


Figura 81: Foso generado por los paneles. Se observa la erosión en la zona central y la deposición en los laterales.

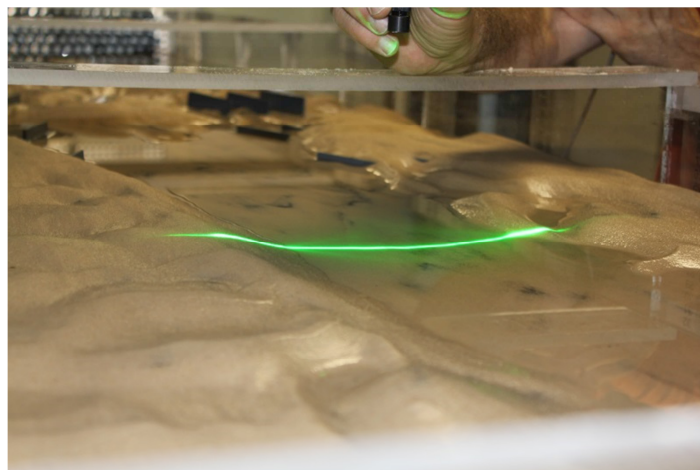


Figura 82: Vista de la deformación del lecho en la zona afectada por paneles mediante laser.

Resultados del cuarto ensayo: Efectos en la zona de desvío

Los resultados de este ensayo van encaminados a determinar si la colocación de paneles sumergidos justo aguas arriba del desvío produce los efectos esperados, a fin de poder corregir el importante desequilibrio en el comportamiento del flujo y el sedimento entre un ramal y otro.

Las primeras variables a determinar son los aportes de caudal líquido y sólido por cada rama. Se ha realizado una toma aproximadamente media hora después de empezar el ensayo y los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Tabla 34: Caudales líquidos medidos con la colocación de paneles.

Cálculo de caudales líquidos					
Ramal	Hora	t acumulado (min)	Nivel abs. (cm)	Δh depósito (cm)	Q (L/s)
Principal	18:45	33	18	12	7,19
Lateral	18:46	34	22	8	2,85

Tabla 35: Reparto de caudales líquidos con paneles.

Reparto de caudales líquidos					
Ramal	Q (L/s)	Q total (L/s)	% Q pral.	% Q lat.	Q pral/Q lat
Principal	7,19	10,03	71,6	28,4	2,5
Lateral	2,85				

Tabla 36: Caudales sólidos medidos con la colocación de paneles.

Cálculo de caudales sólidos					
Ramal	Hora	t acumulado (min)	Δt toma	Peso seco (g)	qs (g/s)
Principal	18:45	33	20	205,2	10,26
Lateral	18:49	37	20	184,61	9,23

Tabla 37: Reparto de caudales sólidos con paneles.

Reparto de caudales sólidos					
Ramal	qs(L/s)	Q total (L/s)	% Q pral.	% Q lat.	Q pral/Q lat
Principal	10,26	19,49	0,5	0,5	1,1
Lateral	9,23				

Una vez vaciado el canal, también se ha hecho una batimetría de la zona, seleccionando los tramos aguas abajo del desvío (en ambas ramas) y un pequeño tramo aguas arriba. La morfología del lecho se muestra mediante una vista 3D de la zona en cuestión:

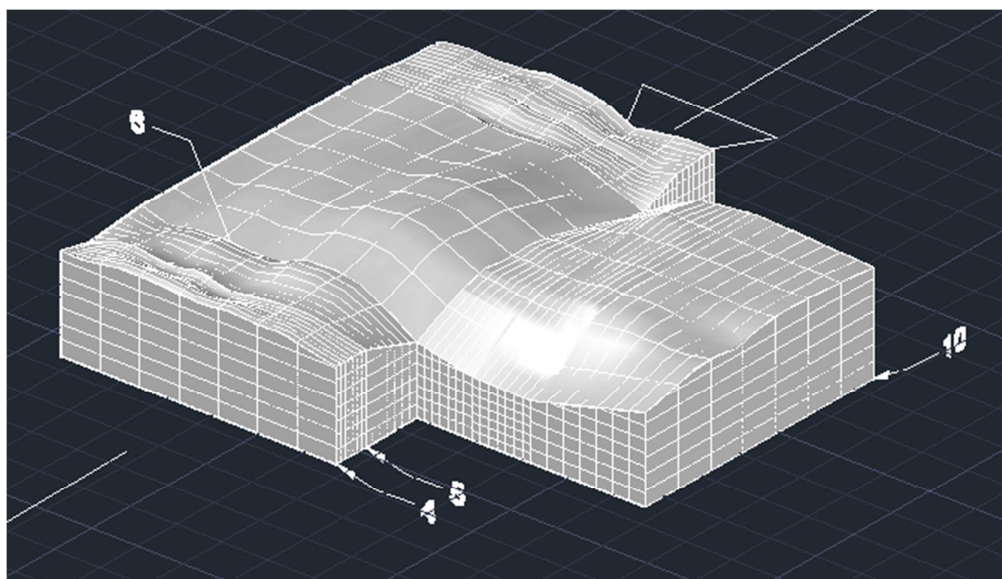


Figura 83: Batimetría realizada mediante vista 3D de la derivación después del ensayo 4.

También se adjuntan diferentes fotografías después del ensayo, que muestran de una visión más global y realista las condiciones finales del sistema:



Figura 84: Estado final de la derivación después del ensayo 4. Se observa el foso y la pérdida de pendiente transversal a la entrada del canal lateral.

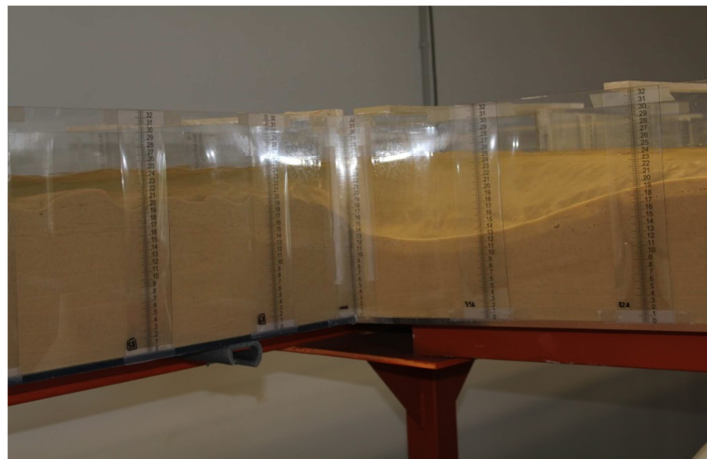


Figura 85: Estado del foso con la colocación de paneles en la derivación. El punto de mayor profundidad se ha desplazado aguas abajo del canal lateral.

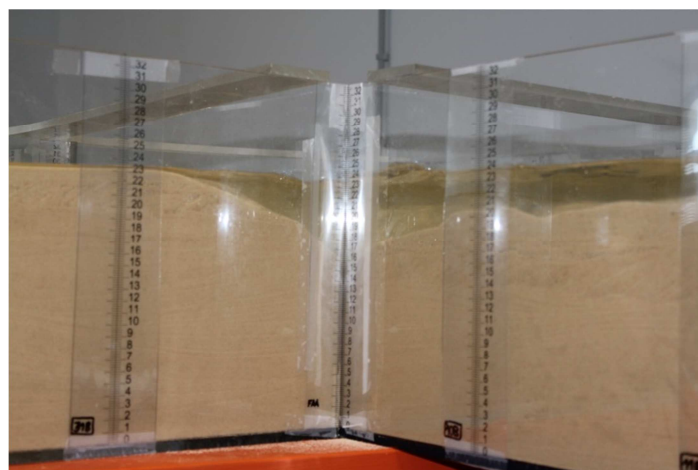


Figura 86: Foso producido en el otro vértice de la derivación, debido a la colocación de paneles.

Una vez mostrados todos los resultados finales y el material recopilado a lo largo de los ensayos, se pasa la discusión de dichos resultados y a la toma de las oportunas conclusiones.

4.2. Discusión de los resultados

En lo referente a los ensayos 1 y 2, relacionados con el comportamiento del flujo y el sedimento sin la colocación de paneles, son varias las cuestiones que se deben discutir. En primer lugar, hace falta destacar que el valor de caudal líquido total medido, juntando los valores referentes a cada ramal, es sensiblemente inferior al calibrado en el pre-proceso de los ensayos. Esto es debido a tres cuestiones distintas:

- La calibración de caudales se ha realizado mediante el método volumétrico y, como ya se ha comentado, la medición de algunos de los niveles de la superficie de agua (sobre todo los relativos a la rama lateral) tenían importantes variaciones debido a las turbulencias.
- Las ecuaciones de caudales en función de los datos obtenidos no son del todo exactas, ya que se realiza un ajuste de la función y, en la mayoría de casos, ésta no pasa por los valores medidos.
- Para calcular de forma idónea el caudal de entrada, se debería haber realizado el comentado método volumétrico en el tanque de entrada. No se realizó esta medida debido a que la toma de valores en este depósito precisaría un piezómetro de importantes dimensiones, y su colocación es bastante más compleja. Además, este tanque y el ubicado aguas abajo de los vertederos mantienen un nivel similar, aunque pueden producirse pequeñas variaciones que modifiquen los resultados.

Por este motivo, los caudales que en un principio se habían considerado de 13,5 y 14,5 L/s, respectivamente, tienen en realidad un valor entre 9 y 10 L/s, por lo que el valor límite en el cual el sistema evoluciona de forma distinta no se ha alcanzado en ninguno de los dos ensayos. Este aspecto también se ha podido analizar observando la evolución del foso y, en los dos casos, en las últimas tomas realizadas, éste ha ido perdiendo profundidad, tendiendo a volver a las condiciones de lecho plano en esta zona (si se hubiera aumentado el tiempo de ensayo se hubieran alcanzado estas condiciones).

NOTA: A partir de este momento, se seguirá utilizando los valores de caudales establecidos anteriormente, aunque se sepa que su valor real es sensiblemente inferior.

En lo referente al reparto de caudales líquidos, destacar que en ambos ensayos la mayor parte del sedimento se dirige hacia el ramal principal, en contraposición con los estudios previos que se habían llevado a cabo anteriormente, donde la relación de toma tenía un valor de 0,5. Además, en el primer ensayo se ha detectado que a medida que transcurre el tiempo, este desequilibrio se acentúa cada vez más, llegando a valores por encima del 80% del caudal total. En el segundo ensayo esta gran variación de aporte por cada rama se observa desde el inicio. Observando los perfiles en la zona del desvío, se determina que el calado es de unos pocos milímetros desde las primeras mediciones, debido a la pendiente transversal que se genera a causa de la zona de recirculación del flujo y a la formación de islas de importantes magnitudes. Al producirse calados tan bajos, el área de la sección también disminuye y, consecuentemente, el caudal circulante.

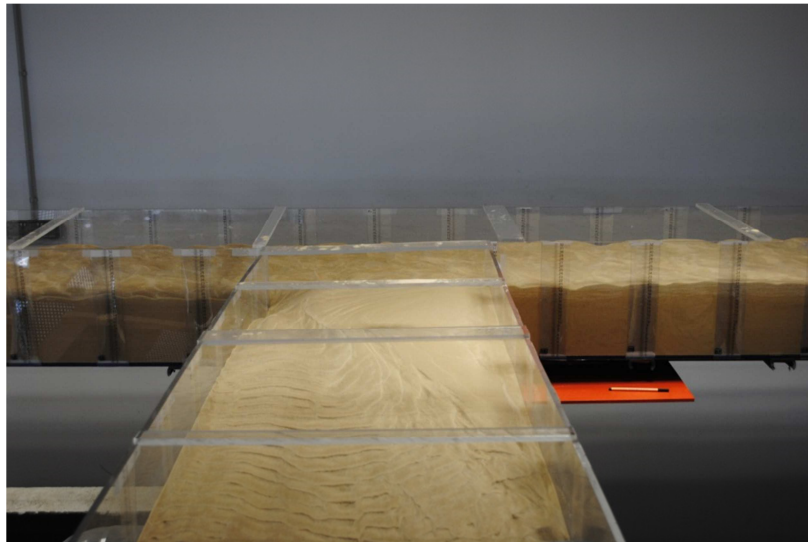


Figura 87: Estado final del lecho, en el que se observa la formación de islas y el foso de la entrada al canal lateral.

Además, también es importante destacar la presencia del flujo secundario en forma de vórtice al inicio del desvío, en la pared derecha del canal lateral (vista aguas abajo), produciendo un importante movimiento de las partículas de sedimento, arrastradas hacia la salida lateral. No obstante, la zona de recirculación, próxima a la otra pared, genera velocidades en sentido contrario al flujo normal que hacen que el sedimento se deposite en la entrada del desvío.

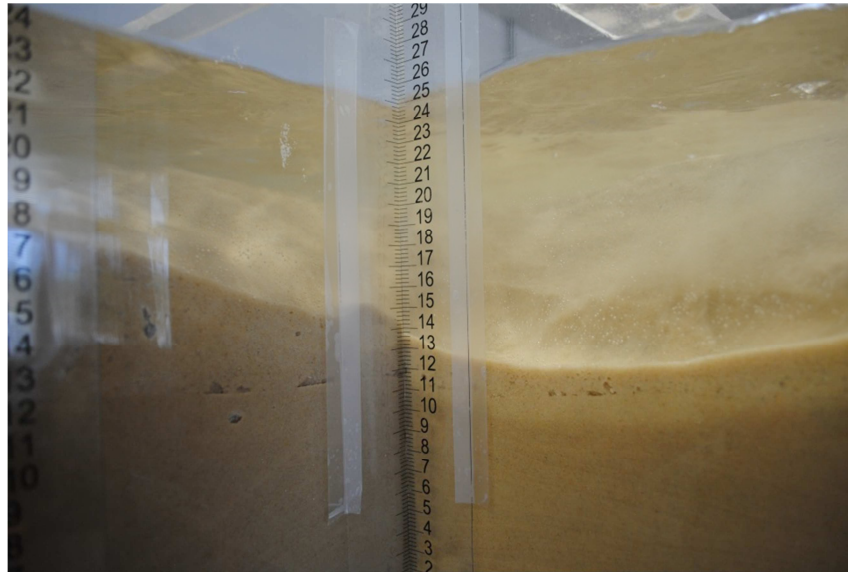


Figura 88: Vórtice generado en el vértice aguas abajo de la derivación.

En cuanto a la repartición del sedimento, el comportamiento de ambos modelos también es similar y alrededor del 70% del material transportado se dirige hacia el ramal principal, en contraposición a toda la fundamentación teórica relacionada con el efecto Bulle. Simplemente destacar que en el primer ensayo se parte desde una condición de lecho plano, por lo que inicialmente el aporte sólido por las dos ramas está bastante equilibrado y en la primera toma de datos, hay un caudal sólido superior a la salida de la rama lateral, siguiendo el comportamiento analizado en los estudios previos. Esto se debe a que una gran cantidad del sedimento que entra por la toma lateral se queda depositado a lo largo esta zona (especialmente a la entrada), produciendo unos valores de caudales sólidos de salida inferiores a los del ramal lateral, ya que en éste no se producen estas deposiciones. Sobre las condiciones de equilibrio, hay que añadir que en el segundo ensayo ya se han alcanzado prácticamente a los pocos minutos de iniciar el experimento, mientras que en el primero se ha necesitado un mayor tiempo para alcanzarlas. Esto supone que los perfiles del lecho en el primer ensayo sean mucho menos uniformes, produciéndose importantes variaciones de cotas a lo largo del canal principal (en el canal lateral, las diferencias se observan en ambos ensayos, debido a los diversos patrones ya comentados).

En lo referente al ensayo 3, la investigación concluye que para un valor de caudal de 14,6 L/s los paneles trabajan de forma correcta, generándose los vórtices previstos, así que pueden ser colocados en posteriores ensayos para las condiciones establecidas. Sin embargo, el corte de la longitud del panel se había realizado para un caudal de 18 L/s, por lo que esta distancia está sobredimensionada y puede afectar a

la eficiencia de las placas. En futuras investigaciones, se realizarán los ensayos con las dimensiones calculadas. También hay que destacar que sólo los primeros grupos de paneles, situados más aguas arriba, trabajan de forma eficiente, ya que los otros han quedado enterrados a causa del transporte de sedimento. Es por este motivo que en el ensayo 4 se ha utilizado únicamente un grupo de 3 paneles.

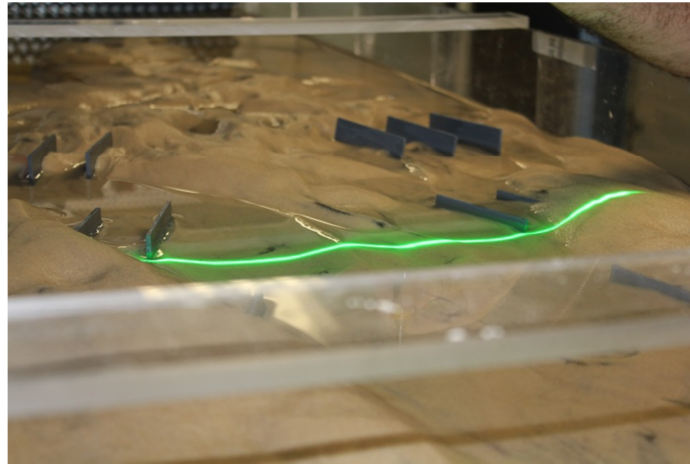


Figura 89: Detalle de los grupos de paneles. El segundo y tercer grupo han quedado enterrados en el lecho.

Además, hay que considerar satisfactoriamente el efecto producido, ya que se ha generado un foso de importantes dimensiones en la parte central del canal, observado mediante las fotografías tomadas y la batimetría generada.

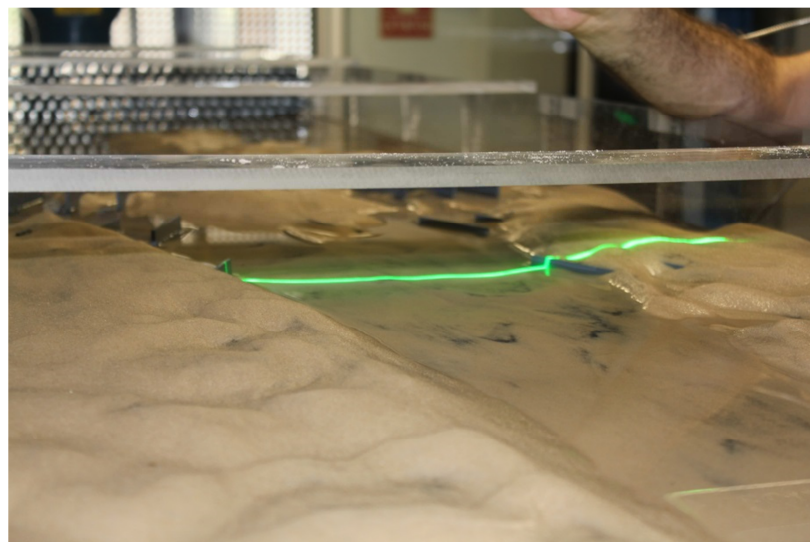


Figura 90: Foso formado en la parte central del canal, analizado mediante vista laser.

Por lo que respecta al ensayo 4, la colocación del grupo de 3 paneles justo aguas arriba de la zona de desvío, en la pared adyacente a la derivación, ha producido importantes modificaciones en el comportamiento del sistema. Por lo que respecta al reparto de caudales líquidos, los cambios no son destacables, ya que alrededor de un

70 % se dirige hacia el canal principal, como en los casos anteriores. En cambio, los cambios generados en el reparto de sedimento son realmente notorios, ya que se ha conseguido que el aporte sólido por los dos ramales sea prácticamente el mismo. Además, la batimetría y las fotografías realizadas determinan que la pendiente transversal generada a la entrada de la derivación va disminuyendo progresivamente, llegando a formar un segundo foso en el otro vértice del desvío. Sin embargo, hay que añadir que los efectos producidos por los paneles no destruyen el vórtice generado debido a la derivación, por lo que será necesario emplear otro tipo de morfología o colocación para ver si puede ser mitigado.

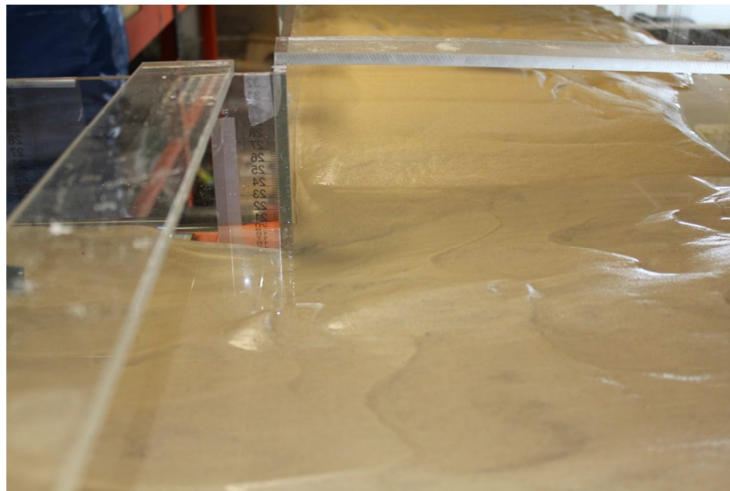


Figura 91: Foso generado en el vértice aguas arriba de la derivación.

4.3. Conclusiones y experiencias

Una vez realizado el procedimiento constructivo, la calibración de caudales y los ensayos, con su posterior análisis del comportamiento del flujo y el sedimento en las distintas condiciones, las conclusiones obtenidas han sido las siguientes:

- El modelo reducido de canal con derivación que se ha construido funciona de forma correcta y se observa un comportamiento muy característico a lo largo de los ensayos. Sin embargo, hay que destacar que se pueden hacer algunas mejoras, como por ejemplo en la tubería de desagüe del canal lateral, que no capta todo el sedimento (en contraposición con la del canal principal, que genera un vórtice que arrastra todo el sedimento hacia la tubería), en el sellado de las juntas de las tuberías o en la colocación de los piezómetros.



Figura 92: Vórtice producido a la salida del canal principal. La salida de sedimento por este lado es casi perfecta.

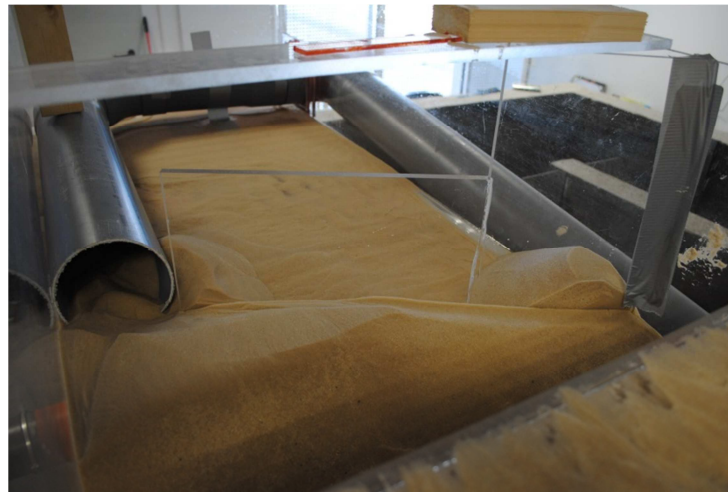


Figura 93: Parte final del canal lateral. Se observa la importante acumulación de arena a la entrada de la tubería.

- La calibración de caudales líquidos no se ha realizado de la mejor manera posible, lo cual conlleva importantes errores en las ecuaciones empleadas, que relacionan este parámetro tanto con las frecuencias del dispositivo que controla la bomba como con los niveles de agua en los depósitos de salida. Sería conveniente colocar un piezómetro en el tanque de entrada, a fin de poder determinar a ciencia cierta cuál es el verdadero caudal de entrada en el canal.
- En cuanto al reparto de caudal líquido, alrededor del 70% tiende a desplazarse hacia el canal principal de forma destacable. En cambio, el transporte sólido tiende a encaminarse hacia el ramal lateral. No obstante, los flujos secundarios tridimensionales en forma de vórtice y las zonas de recirculación hacen que el sedimento se deposite a la entrada de la derivación. La evolución de la topografía del lecho aporta la información adicional necesaria para corroborar esta teoría, ya que se producen importantes elevaciones del cauce en este

tramo.

- La implantación de la técnica de los paneles sumergidos como medida de gestión de sedimento provoca importantes cambios en el comportamiento de éste, produciendo un flujo helicoidal que genera modificaciones en las características del flujo principal. Esta medida produce efectos beneficiosos tanto en el tramo recto del canal, generando un foso en la zona central del cauce, como en la zona de la derivación, equilibrando el aporte sólido y consiguiendo que prácticamente la misma cantidad vaya en ambas direcciones.

Para acabar este apartado, también es necesario hacer un breve resumen de las experiencias personales vividas en el transcurso del trabajo. Personalmente, ha sido muy productivo realizar esta investigación desde el primer momento, ya que, por una parte, me he familiarizado mucho más con las actividades relacionadas con el laboratorio, ya sea todo el proceso constructivo llevado a cabo para obtener el modelo diseñado final o la metodología y el procedimiento a seguir en los ensayos. Por otro lado, ha sido realmente productivo dar un paso adelante en el campo de la dinámica fluvial y observar en primera persona la evolución tanto del flujo como del transporte de sedimento en las diferentes condiciones analizadas. Además, el no alcanzar algunos de los objetivos que se habían planteado inicialmente hace motivador el continuar investigando sobre el modelo construido.

Espero y deseo que todo el trabajo llevado a cabo sirva de ayuda para en un futuro conocer y dominar más el comportamiento en derivaciones en la vida real, para así poder llegar a resolver algunos de los problemas que en este documento se han descrito.

4.4. Futuras líneas de investigación

Las futuras líneas de investigación tienen como objetivo mejorar el conocimiento acerca del comportamiento del flujo y el transporte de sedimento en las derivaciones. Por una parte, es interesante destacar que los ensayos realizados pueden ser mejorados desde diferentes puntos de vista, que a continuación se detallan:

- Realización de investigaciones similares a las de los ensayos 1 y 2 con un caudal que realmente esté por encima del umbral fijado en el valor de 14,25

L/s, ya que los dos caudales empleados en los experimentos están por debajo de este valor. De esta forma se podrá estudiar verdaderamente la diferencia del comportamiento del flujo y del sedimento en el sistema implantado.

- Utilización de paneles sumergidos con las características diseñadas en cuanto a dimensionamiento y colocación de éstos, reduciendo su longitud y observando su comportamiento y consecuencias dentro del sistema. Además, sería interesante averiguar en qué condiciones se pueden utilizar un mayor número de grupos de paneles (en el ensayo realizado la mayoría quedaron enterrados), a fin de poder mitigar los efectos producidos por el flujo secundario en forma de vórtice que se genera como consecuencia de la derivación.

Por otro lado, la realización de variaciones a lo largo de los ensayos de diversos parámetros que también controlan el comportamiento del flujo y el sedimento sería de gran importancia, a fin de conocer a ciencia cierta su relevancia dentro del sistema. Estos parámetros, que se han mantenido constantes a lo largo de la investigación expuesta, podrían ser, por ejemplo, el caudal sólido, el ángulo de desvío o el diámetro del sedimento.

Bibliografía

- Altinakar, M. S., Graf, W. H., and Hopfinger, E. J. (1990). Weakly depositing turbidity current on a small slope. *J. Hydraulic Res.* 28(1), 55-80.
- Bradford, S., Katopodes, N. (1999). Hydrodynamics of turbid underflows.: Formulation and numerical analysis. *J. Hydraulic Eng.* 125(10), 1006–1015.
- Bradford, S., Katopodes, N., Parker, G. (1997), Characteristic analysis of turbid underflows. *J. Hydraulic Eng.* 123(5), 420–431.
- Davidson, L. "An Introduction to Turbulence Models", Chalmers University of Technology. Department of Thermo and Fluid Dynamics, Göteborg, Sweden, 2011.
- García, M. H., Parker, G. (1991). Entrainment of bed sediment into suspension. *J. Hydraulic Eng.* 117(4), 414-435.
- García, M. H. (1993). Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents. *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, 119(10), 1094-1117.
- García, M. (1994), Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment. *J. Hydraulic Eng.* 120(11), 1240–1263.
- García, M. H. (2008). *Sedimentation Engineering*. # ASCE.
- Keulegan, G. H. "Laws of Turbulence Flow in Open Channels", J Res. at the Nat. Bureau of Standards, 21, Research Paper RP 1151, 707-741, 1938.
- La Rocca, M., Bateman, A. (2010), Experimental and theoretical modeling of 3D gravity currents, Numerical Simulations. Examples and Applications in Computational Fluid Dynamics. *Intech*, 281-310.
- Odgaard, A. J., i Mosconi, C. E. "Streambank protection by submerged vanes." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 1987, 113(4), 520 - 536.
- Odgaard, A. J. i Spoljaric, A. "Sediment control by submerged vanes. Design basis" River meandering, S. Ikeda and G. Parker, eds., Water Resources Monograph, 1989, No. 12, American geophysical Union, 127 - 151.
- Odgaard A. J. i Wang Y. "Sediment Management with Submerged Vanes. I: Theory", *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991a, Vol. 117, No 3.
- Parker, G., Fukushima, Y., Pantin, H. (1986). Self-accelerating turbidity currents. *J. Fluid Mech.* 171, 145–181.
- Pratson, L., Imran, J., Hutton, E., Parker, G., Syvitski, J. (2001). Bang1D: a one-dimensional, lagrangian model of subaqueous turbid surges. *Computers & geosciences* 27(6), 701–716. *Experimental and theoretical analysis of flow and sediment transport in 90-degree fluvial diversions*.
- Wang, Y. "Sediment control with submerged vanes," thesis presented to the University of Iowa, at Iowa City, Iowa, in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Doctor of Philosophy, 1990.

Wright, S., Parker, G. (2004a). Density stratification effects in sand bed rivers. *J. Hydraulic Eng.* 130(8), 783-795.

Wright, S. and Parker, G. (2004b). Flow resistance and suspended load in sand-bed rivers: simplified stratification model. *J. Hydraulic Eng.* 130(8), 796-805.